

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

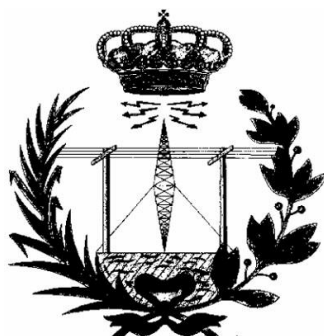


Estudio e influencia en el calentamiento de
muestras del diseño de aplicadores poliédricos
de microondas.



AUTOR: Bernardo Martínez Victoria
DIRECTOR: Juan Luis Pedreño Molina
CO-DIRECTOR: Juan Monzó Cabrera
Mayo / 2013

A D. Juan Luis Pedreño Molina y D. Juan Monzó Cabrera, por su dedicación y disposición,
a mis padres y a mis hermanos, por su paciencia, cariño, apoyo incondicional
y por confiar siempre en mí incluso cuando yo había dejado de hacerlo.



Autor	Bernardo Martínez Victoria	e-mail	bernard.ct@gmail.com
Director	Juan Luis Pedreño Molina	e-mail	juan.pmolina@upct.es
Co-director	Juan Monzó Cabrera	e-mail	juan.monzo@upct.es
Título	Estudio e influencia en el calentamiento de muestras del diseño de aplicadores poliédricos de microondas.		
<p>Resumen</p> <p>El objetivo de este proyecto es analizar la influencia del diseño del aplicador de microondas en el calentamiento de una muestra. Para ello se ha realizado para cada una de las muestras una simulación con un diseño cúbico y otra con un diseño hexagonal para estudiar cuál de ellos consigue un proceso de calentamiento más eficaz.</p> <p>Se han realizado simulaciones con dos diseños distintos, el diseño cúbico y el diseño hexagonal, modificando en ambos su número de puertos de alimentación. Se han utilizado seis muestras distintas para cada simulación; resina, madera de abedul, mármol, maíz, trigo y pasta húmeda. En el desarrollo del proyecto se utilizará el simulador electromagnético tridimensional CST Microwave Studio para el cálculo de las distribuciones del campo eléctrico, y Matlab para representar y procesar los resultados obtenidos previamente con el simulador.</p>			
Titulación	I. T. Telecomunicación, especialidad Telemática		
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones		
Fecha presentación	Mayo 2013		

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. PLANTEAMIENTO INICIAL DEL PROYECTO.....	13
1.2. OBJETIVOS.....	14
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE TAREAS DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.	15
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	15
2.2 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SISTEMA BÁSICO POR MICROONDAS.	17
2.2.1 El Magnetrón.....	17
2.2.2 Guía de Onda.....	18
2.2.3 Aplicador de Microondas.....	20
2.3 EJEMPLOS DE APLICACIONES INDUSTRIALES DE MICROONDAS.	21
2.3.1 Procesado de cerámicos.....	22
2.3.2 Industria alimentaria.....	25
2.3.2 Agricultura y sector textil.....	27
CAPÍTULO 3. ESCENARIO EXPERIMENTAL.....	31
3.1 SIMULADOR CST MICROWAVE STUDIO.....	31
3.2 DISEÑOS REALIZADOS.....	35
3.2.1 Diseño cúbico.....	39
3.2.2 Diseño hexagonal.....	42
3.3 MUESTRAS UTILIZADAS Y PARÁMETROS.....	48
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.	49
4.1 SIMULACIÓN DEL DISEÑO CÚBICO.....	50
4.1.1 Resultados diseño cúbico con una guía de onda.....	50
4.1.1.1 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de resina.....	50
4.1.1.2 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de madera de abedul.....	52
4.1.1.3 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de mármol.....	54
4.1.1.4 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de maíz.....	56
4.1.1.5 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de trigo.....	58
4.1.1.6 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de pasta húmeda.....	60
4.1.2 Resultados diseño cúbico con tres guías de ondas.....	62
4.1.2.1 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de resina.....	62
4.1.2.2 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de madera de abedul.....	64
4.1.2.3 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de mármol.....	66
4.1.2.4 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de maíz.....	68
4.1.2.5 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de trigo.....	70
4.1.2.6 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de pasta húmeda.....	72

4.2 SIMULACIÓN DEL DISEÑO HEXAGONAL.	74
4.2.1 Resultados diseño hexagonal con una guía de onda.	74
4.2.1.1 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de resina.	74
4.2.1.2 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de madera de abedul.	76
4.2.1.3 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de mármol.	78
4.2.1.4 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de maíz.	80
4.2.1.5 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de trigo.	82
4.2.1.6 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de pasta húmeda.	84
4.2.2 Resultados diseño hexagonal con tres guías de ondas.	86
4.2.2.1 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de resina.	86
4.2.2.2 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de madera de abedul.	88
4.2.2.3 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de mármol.	90
4.2.2.4 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de maíz.	92
4.2.2.5 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de trigo.	94
4.2.2.6 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de pasta húmeda.	96
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.	101
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2. 1 ESPECTRO DE FRECUENCIAS	15
FIGURA 2. 2 DIAGRAMA SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS BÁSICO	17
FIGURA 2. 3 ESQUEMA DE UN MAGNETRÓN.....	18
FIGURA 2. 4 GEOMETRÍAS DE GUÍAS DE ONDA.....	19
FIGURA 2. 5 HORNO DE SINTERIZACIÓN INDUSTRIAL (T ^a MAX 1300 °C Y FREC 2.45GHz±25MHz)	23
FIGURA 2. 6 HORNO DE MICROONDAS PARA EL CURADO DE LAS CUBIERTAS DE RESINA EN EL MÁRMOL.....	24
FIGURA 2. 7 DESHIDRATADOR DE GRANO (MOD: LT-100KW 2450±50MHZ).....	27
FIGURA 2. 8 TÚNEL DE SECADO POR MICROONDAS (MOD: MDS DRYING S. 2450±50MHZ)	27
FIGURA 2. 9 EQUIPO PARA DESINSECTACIÓN DE GRANO (MOD: MDF-N 60KW 2.45GHz±25MHz)	28
FIGURA 2. 10 TÚNEL MICROONDAS PARA SECADO DE CUERO (GEM).....	29

CAPÍTULO 3

FIGURA 3. 1 VENTANA PRINCIPAL DE MICROWAVE CST STUDIO.....	32
FIGURA 3. 2 HEPHAISTOS MICROWAVE OVEN VHM 100/100.....	36
FIGURA 3. 3 COMPARATIVA DISTRIBUCIÓN DE CAMPO DE UN APLICADOR HEXAGONAL Y CILÍNDRICO.....	37
FIGURA 3. 4 DISEÑO CÚBICO	39
FIGURA 3. 5 PUERTO DE ALIMENTACIÓN - DISEÑO CÚBICO	39
FIGURA 3. 6 TRES PUERTOS DE ALIMENTACIÓN - DISEÑO CÚBICO	40
FIGURA 3. 7 PLATO DE TEFLÓN - DISEÑO CÚBICO.....	40
FIGURA 3. 8 MUESTRA - DISEÑO CÚBICO	41
FIGURA 3. 9 DEFINICIÓN PUNTOS HEXÁGONO	42
FIGURA 3. 11 DISEÑO CUBIERTA HEXÁGONO	43
FIGURA 3. 12 DISEÑO GROSOR HEXÁGONO	44
FIGURA 3. 13 DISEÑO HEXAGONAL	44
FIGURA 3. 14 PUERTO ALIMENTACIÓN - DISEÑO HEXAGONAL	45
FIGURA 3. 15 DISEÑO ERRÓNEO DE LOS PUERTOS	45
FIGURA 3. 16 TRES PUERTOS DE ALIMENTACIÓN - DISEÑO HEXAGONAL	46
FIGURA 3. 17 PLATO DE TEFLÓN - DISEÑO HEXAGONAL.....	46
FIGURA 3. 18 MUESTRA - DISEÑO HEXAGONAL	47

CAPÍTULO 4

FIGURA 4. 1 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE RESINA.....	50
FIGURA 4. 2 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	50
FIGURA 4. 3 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	51
FIGURA 4. 4 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL.....	52
FIGURA 4. 5 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	52
FIGURA 4. 6 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	53
FIGURA 4. 7 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MÁRMOL	54
FIGURA 4. 8 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	54
FIGURA 4. 9 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	55
FIGURA 4. 10 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MAÍZ	56
FIGURA 4. 11 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	56
FIGURA 4. 12 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	57
FIGURA 4. 13 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE TRIGO.....	58
FIGURA 4. 14 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	58
FIGURA 4. 15 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	59
FIGURA 4. 16 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	60
FIGURA 4. 17 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	60
FIGURA 4. 18 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	61
FIGURA 4. 19 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE RESINA.....	62
FIGURA 4. 20 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	62
FIGURA 4. 21 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	63
FIGURA 4. 22 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL.....	64

FIGURA 4. 23 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	64
FIGURA 4. 24 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	65
FIGURA 4. 25 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MÁRMOL.	66
FIGURA 4. 26 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	66
FIGURA 4. 27 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	67
FIGURA 4. 28 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MAÍZ	68
FIGURA 4. 29 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	68
FIGURA 4. 30 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	69
FIGURA 4. 31 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE TRIGO.....	70
FIGURA 4. 32 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	70
FIGURA 4. 33 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	71
FIGURA 4. 34 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	72
FIGURA 4. 35 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	72
FIGURA 4. 36 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	73
FIGURA 4. 37 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE RESINA.....	74
FIGURA 4. 38 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	74
FIGURA 4. 39 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	75
FIGURA 4. 40 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL.	76
FIGURA 4. 41 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	76
FIGURA 4. 42 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	77
FIGURA 4. 43 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MÁRMOL.	78
FIGURA 4. 44 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	78
FIGURA 4. 45 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	79
FIGURA 4. 46 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MAÍZ	80
FIGURA 4. 47 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	80
FIGURA 4. 48 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	81
FIGURA 4. 49 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE TRIGO.....	82
FIGURA 4. 50 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	82
FIGURA 4. 51 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	83
FIGURA 4. 52 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE PASTA	84
FIGURA 4. 53 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	84
FIGURA 4. 54 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	85
FIGURA 4. 55 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE RESINA.....	86
FIGURA 4. 56 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	86
FIGURA 4. 57 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	87
FIGURA 4. 58 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL.....	88
FIGURA 4. 59 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	88
FIGURA 4. 60 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	89
FIGURA 4. 61 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MÁRMOL	90
FIGURA 4. 62 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	90
FIGURA 4. 63 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	91
FIGURA 4. 64 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE MAÍZ	92
FIGURA 4. 65 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	92
FIGURA 4. 66 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	93
FIGURA 4. 67 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE TRIGO.....	94
FIGURA 4. 68 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	94
FIGURA 4. 69 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	95
FIGURA 4. 70 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DEL DISEÑO PARA LA MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	96
FIGURA 4. 71 REPRESENTACIÓN 3D Y 2D DEL VALOR ABSOLUTO DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	96
FIGURA 4. 72 REPRESENTACIÓN CORTE VOLUMÉTRICO Y PLANO SUPERFICIAL DE LA MUESTRA	97

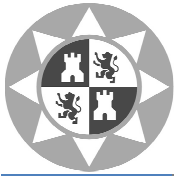
ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3

TABLA 3. 1 MEDIDAS DEL DISEÑO CÚBICO.	37
TABLA 3. 2 MEDIDAS DEL DISEÑO HEXAGONAL.	38
TABLA 3. 3 UNIDADES - DISEÑO CÚBICO.....	41
TABLA 3. 4 UNIDADES - DISEÑO HEXAGONAL.....	47
TABLA 3. 5 PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS (<i>PHYSICAL PROPERTIES OF FOODS, SERPIL SAHIN, 2006</i>)	48

CAPÍTULO 4

TABLA 4. 1 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO CON UNA GUÍA Y MUESTRA DE RESINA.....	51
TABLA 4. 2 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO CON UNA GUÍA Y MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL	53
TABLA 4. 3 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO CON UNA GUÍA Y MUESTRA DE MÁRMOL....	55
TABLA 4. 4 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO UNA GUÍA Y MUESTRA DE MAÍZ.....	57
TABLA 4. 5 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO UNA GUÍA Y MUESTRA DE TRIGO	59
TABLA 4. 6 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO UNA GUÍA Y MUESTRA DE PASTA HÚMEDA .	61
TABLA 4. 7 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE RESINA.....	63
TABLA 4. 8 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA MADERA DE ABEDUL	65
TABLA 4. 9 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE MÁRMOL....	67
TABLA 4. 10 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE MAÍZ.....	69
TABLA 4. 11 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE TRIGO	71
TABLA 4. 12 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO CÚBICO DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	73
TABLA 4. 13 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE RESINA75	
TABLA 4. 14 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE MADERA DE ABEDUL	77
TABLA 4. 15 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE MÁRMOL	79
TABLA 4. 16 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE MAÍZ...81	
TABLA 4. 17 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE TRIGO .83	
TABLA 4. 18 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE UNA GUÍA Y MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	85
TABLA 4. 19 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS CON MUESTRA DE RESINA.....	87
TABLA 4. 20 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS Y MUESTRA MADERA DE ABEDUL	89
TABLA 4. 21 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE MÁRMOL.....	91
TABLA 4. 22 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE MAÍZ 93	
TABLA 4. 23 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE TRIGO	95
TABLA 4. 24 PARÁMETROS CALCULADOS PARA DISEÑO HEXAGONAL DE TRES GUÍAS Y MUESTRA DE PASTA HÚMEDA	97
TABLA 4. 25 TABLA RESUMEN ESTADÍSTICOS MEDIA Y VARIANZA.....	98
TABLA 4. 26 ADAPTABILIDAD Y DISTRIBUCIÓN PARA CADA MUESTRA.....	99
TABLA 4. 27 TEMPERATURA Y DISPERSIÓN PARA CADA MUESTRA	100



Capítulo 1. Introducción.

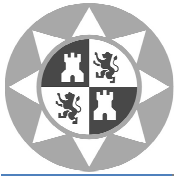
1.1. Planteamiento Inicial del Proyecto.

En la sociedad actual crece de una forma exponencial el uso de las microondas en diversos sectores. Las microondas están siendo ampliamente usadas en el campo de las comunicaciones y en el calentamiento de alimentos, sin embargo, en los últimos años destaca sobre todas ellas el calentamiento de materiales en procesos industriales, esto conlleva a que industrias como la metalurgia, la construcción y la cerámica investiguen la utilidad de esta tecnología para aplicarla en sus procesos de producción.

El calentamiento por microondas se puede considerar un hallazgo logrado a partir del desarrollo radar durante la segunda Guerra Mundial, fue justo después de esta guerra cuando Percy Spencer relacionó la generación de calor de una antena de radar con su potencial para calentar alimentos, esto sucedió mientras el científico trabajaba para la empresa Raytheon, para el año 1947 la empresa sacó al mercado hornos de microondas para uso doméstico. El horno microondas es una de las grandes invenciones del siglo XX, en la actualidad más del 75% de los hogares españoles cuentan con un horno de este tipo.

El calentamiento en un horno microondas depende, a diferencia de los hornos convencionales, de las características del material y no del medio, lo que origina una clasificación de estos según, absorban, sean transparentes o reflejen la energía microonda. Por ejemplo, agua, carbono y alimentos con alto contenido de agua son buenos para absorber energía de las microondas; sin embargo, vidrio, cerámica y la mayoría de los materiales termoplásticos permiten el paso de las microondas con ninguno o un pequeño grado de absorción [1].

Pese al gran número de ventajas que ofrece el tratamiento con microondas, existen inconvenientes como la limitada aplicación a muestras de gran volumen, el elevado coste de las instalaciones y, sobre todo, la falta de uniformidad en la distribución de la temperatura en el interior de la muestra, uno de los aspectos que más repercute en la calidad final del producto tratado.



Cuando no existe un adecuado control de la uniformidad del calentamiento pueden aparecer los llamados «puntos fríos» y los «puntos calientes», donde pueden tener lugar degradaciones térmicas excesivas con el consiguiente detrimento en las propiedades sensoriales de la muestra.

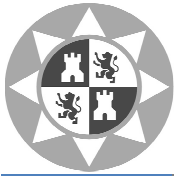
Por todo ello, es preciso conocer y controlar los factores que afectan al calentamiento, tanto los relacionados con los equipos (tipo de horno, frecuencia, potencia) como con las características inherentes a la muestra (composición, propiedades físicas, tamaño o forma). Es por ello que este proyecto nace con el objetivo de diseñar dos escenarios posibles en función del diseño del aplicador de microondas y del número de guías de onda, con el fin de analizar su influencia en el calentamiento de las muestras [2].

1.2. Objetivos.

El funcionamiento de la radiación electromagnética por medio de microondas depende de muchos parámetros entre los que se encuentran el estado físico del material, la composición química del material, la temperatura, la potencia o el tiempo de incidencia entre otros.

El aplicador de microondas se podría definir como aquella estructura metálica que permite confinar la energía del microondas junto con el material a calentar y que es responsable de la eficiencia energética del proceso y de la uniformidad de calentamiento.

Debido a la importancia de esta estructura, el objetivo del presente proyecto es realizar una simulación con distintos diseños (cúbico y hexagonal) del aplicador de microondas, para estudiar cuál de ellos consigue un proceso de calentamiento más eficaz. El estudio comenzara a partir del diseño más común, el de forma cúbica, sobre distintos materiales y continuara con el diseño hexagonal (ambos diseños con una y con tres guías de onda), con el fin de comparar los resultados de las simulaciones mediante el programa CST Microwave Studio. Finalmente mediante la herramienta de software matemático Matlab, se representarán cada uno de los resultados correspondientes a cada simulación.



Capítulo 2. Antecedentes de tareas de calentamiento por microondas.

2.1. Estado del arte.

El concepto de «microonda» no está adscrito a un margen de frecuencias con unos límites universalmente aceptados, y suele utilizarse más bien para identificar señales en cuya generación, propagación y procesado se utilizan un conjunto de técnicas muy específicas que no se emplean ni en la Electrónica de baja frecuencia ni en la Óptica. Con este criterio puede considerarse que las «microondas» son todas aquellas ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre unos 300 MHz y unos 300 GHz. En las bandas más utilizadas en radiocomunicaciones (entre unos 2 MHz y unos 2 GHz) también es habitual llamar a las señales «señales de radiofrecuencia» o señales RF. No sería justo dissociar completamente el estudio de las microondas del de las señales RF, de hecho, ambos tipos de ondas comparten no sólo bandas en frecuencia de interés sino también muchas aplicaciones importantes [3].

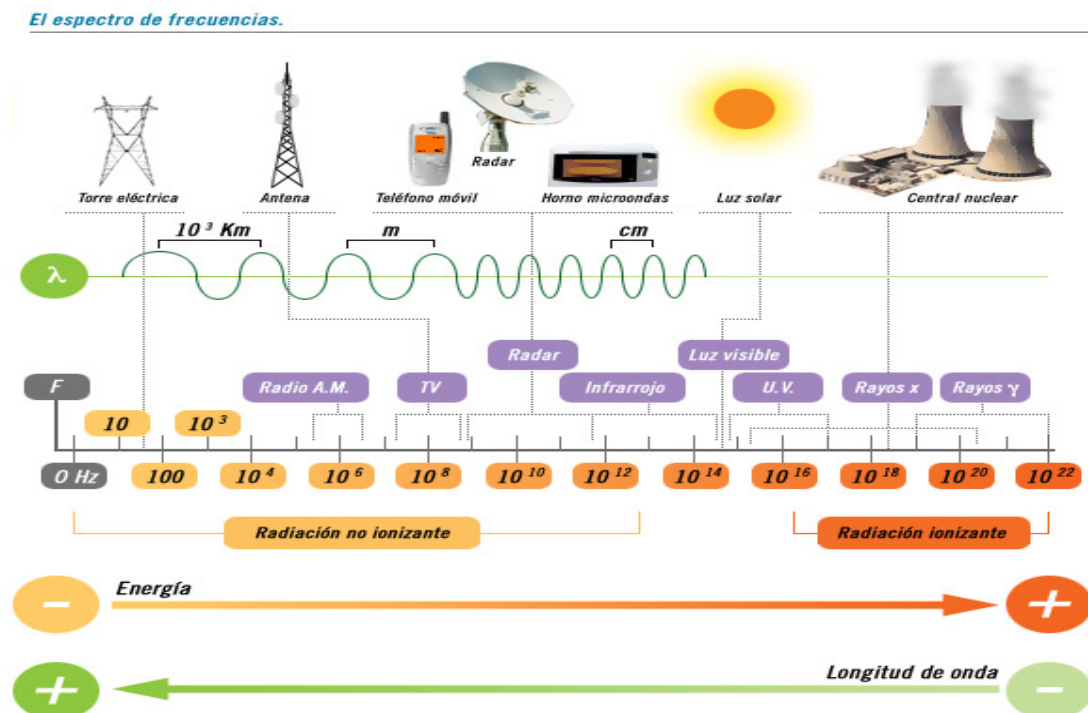
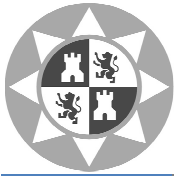


Figura 2. 1 Espectro de frecuencias



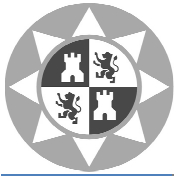
Inicialmente la ingeniería de microondas fue casi sinónimo de ingeniería de radar¹, el primer sistema de radar práctico se atribuye a Christian Hülsmeier, quien en 1904 patentó un dispositivo para navegación de barcos y detección de obstáculos, cuya finalidad era esencialmente evitar la colisión. Este dispositivo fue ofrecido a la marina alemana, pero suscitó entonces un escaso interés debido a que en aquella época no existía aún una necesidad apremiante de este tipo de aplicaciones.

A comienzos de la Segunda Guerra Mundial se experimentó el primer gran desarrollo de los radares, como respuesta a la necesidad de disponer de algún método de detección eficaz y de largo alcance que fuera capaz de localizar aviones, barcos o carros de combate en condiciones de visibilidad deficientes. En la década de 1930-1940 se realizaron estudios exhaustivos de la tecnología de radar simultáneamente en distintos países, como Gran Bretaña, Alemania, Estados Unidos, Italia, Japón, Francia y la antigua Unión Soviética. La mayor parte de los radares construidos en aquella época funcionaban a frecuencias de VHF (por debajo de unos 200 MHz), a excepción de algunos diseños alemanes que operaban a 375 y 560 MHz. No obstante, en 1939 Henry A.H. de Boot y John T. Randall inventaron el magnetrón en la Universidad de Birmingham, un generador de alta potencia que permitió realizar diseños de radares a frecuencias de microondas con un elevado alcance. Un año después este invento fue cedido a Estados Unidos, y los investigadores del en aquel entonces recientemente constituido Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) lo utilizaron como componente clave en sus célebres desarrollos de la tecnología del radar. Desde entonces, el campo de la ingeniería de microondas se identifica como una disciplina madura debido a que los conceptos fundamentales de electromagnetismo se establecieron por James Clerk Maxwell² en 1873.

No es objetivo de este proyecto explicar la teoría electromagnética ni demostrar las ecuaciones que describen por completo los fenómenos electromagnéticos, sino dar una visión global de la importancia que tiene la ingeniería de microondas en los procesos industriales en la actualidad y analizar cómo influyen en el calentamiento de una muestra.

¹ El término radar (acrónimo de las palabras Radio Detection And Ranging) es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones o velocidades mediante la emisión de un impulso de radio que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor.

² Físico escocés conocido principalmente por haber desarrollado la teoría electromagnética clásica, sintetizando todas las anteriores observaciones, experimentos y leyes sobre electricidad, magnetismo y aun sobre óptica, en una teoría consistente.



En 1941 Percy L. Spencer mientras trabajaba en la empresa Raytheon, desarrolló una forma más eficiente para la fabricación de magnetrones mediante punzonado y soldadura de piezas y consiguió aumentar la producción de estos de 17 unidades diarias a 2.600 unidades. En 1945, tras observar cómo se derretía una barra de chocolate y repitiendo el experimento con palomitas de maíz, desarrolló el primer horno microondas [3]. En la figura se muestra el funcionamiento básico de cualquier sistema de calentamiento por microondas:

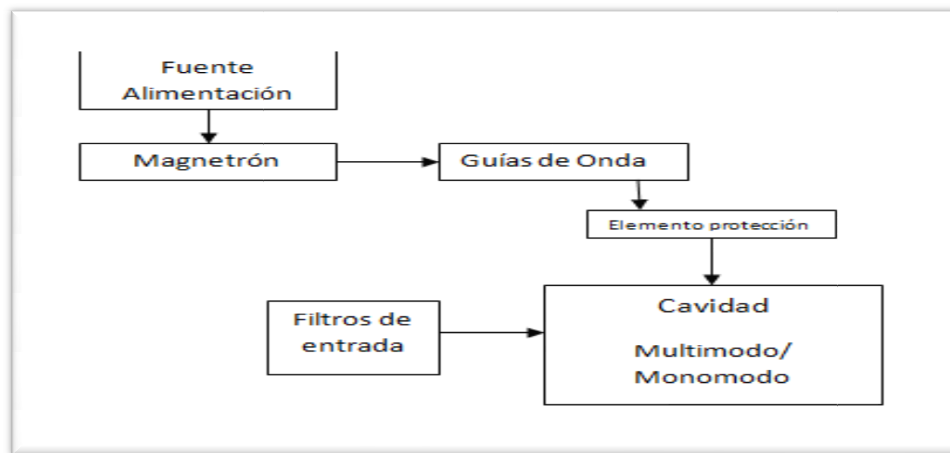
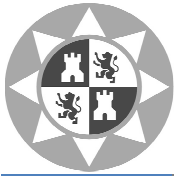


Figura 2. 2 Diagrama sistema de calentamiento por microondas básico

2.2 Principales componentes de un sistema básico por microondas.

2.2.1 El Magnetron.

El magnetron (Figura 2.3) es el encargado de transformar la energía eléctrica suministrada por la fuente de alimentación en energía de microondas. Tiene un filamento metálico de titanio que, al hacerle circular una corriente eléctrica, se calienta y produce una nube de electrones a su alrededor. Este filamento se encuentra en una cavidad cilíndrica de metal que al aplicarle un potencial positivo de alto voltaje con respecto al filamento, éste atrae a las cargas negativas. Viajarían en forma radial, pero un campo magnético aplicado por sendos imanes permanentes obligan a los electrones a girar alrededor del filamento en forma espiral para alcanzar el polo positivo de alto voltaje.



Al viajar en forma espiral, los electrones generan una onda electromagnética perpendicular al desplazamiento de los mismos, que es expulsada por un orificio de la cavidad como guía de onda. Las dimensiones del magnetrón permiten controlar la frecuencia de la señal que emite.

Al conjunto fuente más magnetrón se le suele denominar normalmente fuente de microondas y cada fuente suele estar asociada a un puerto acoplado a la cavidad de microondas. La antena del magnetrón se acopla a la guía de onda hacia la que transmite la energía de microondas.

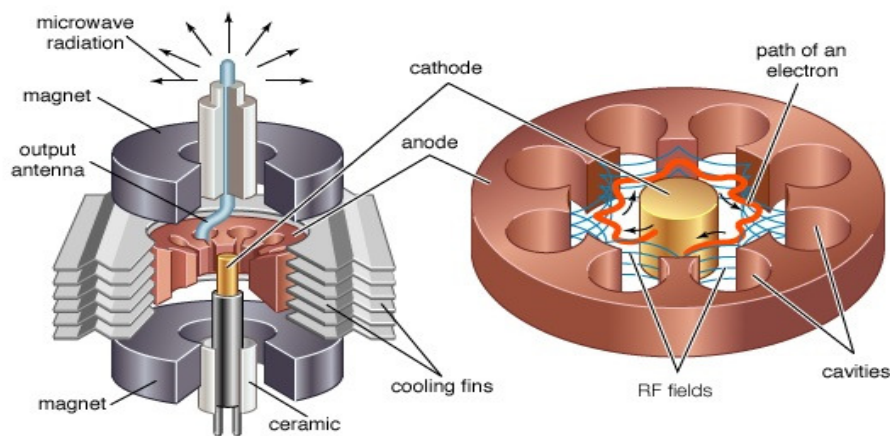
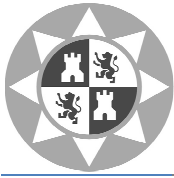


Figura 2. 3 Esquema de un magnetrón.

2.2.2 Guía de Onda.

Una guía de onda puede ser definida como una estructura destinada a la propagación dirigida y acotada de radiación electromagnética punto a punto de forma eficiente. El medio dieléctrico en el que esta propagación se produce está limitado, ya sea por un material conductor (para microondas y radiofrecuencia), ya sea por otro dieléctrico (para frecuencias ópticas).

Las guías de onda se basan en el confinamiento de la luz, efecto que se logra mediante el uso de dos medios con índice de refracción diferente. El medio con índice de refracción menor (núcleo) se embebe en el medio con índice de refracción mayor (revestimiento o cubierta) y la luz queda confinada en el medio el núcleo debido a reflexión total interna.



La geometría de las guías de onda puede ser plana (slab, strip) o cilíndrica:

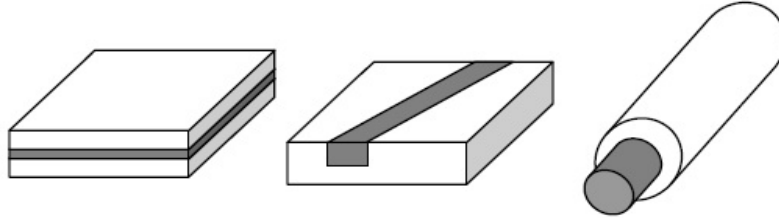
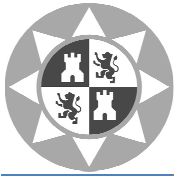


Figura 2. 4 Geometrías de guías de onda.

Existen muchos tipos de guías de onda, las más importantes son:

- Guía de onda rectangular (circular, elíptica): Son aquellas cuya sección transversal es rectangular (circular, elíptica).
- Guía de onda de haz: constituida por una sucesión de lentes o espejos, capaz de guiar una onda electromagnética.
- Guía de onda tabicada: Formada por dos cilindros metálicos coaxiales unidos en toda su longitud por un tabique radial metálico.
- Guía de onda acanalada, guiada en V; guiada en H: Guía de onda rectangular que incluye resaltes conductores interiores a lo largo de una de cada una de las paredes de mayor dimensión.
- Guía de onda carga periódicamente: Guía de onda en las que la propagación viene determinada por las variaciones regularmente espaciadas de las propiedades del medio, de las dimensiones del medio o de las superficie de contorno.
- Guía de onda dieléctrica: Formada íntegramente por uno o varios materiales dieléctricos, sin ninguna pared conductora.

Las guías de onda electromagnéticas se analizan resolviendo las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones tienen soluciones múltiples, o modos, que son las autofunciones del sistema de ecuaciones, cada modo está caracterizado por un autovalor, que corresponde a la velocidad de propagación axial de la onda en la guía. Los modos de propagación dependen de la longitud de onda, de la polarización y de las dimensiones de la guía.



El modo longitudinal de una guía de onda es un tipo particular de onda estacionaria formado por ondas confinadas en la cavidad. Los modos transversales se clasifican en tipos distintos:

- Modo TE (Transversal eléctrico), la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.
- Modo TM (Transversal magnético), la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo TEM (Transversal electromagnético), la componente tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo híbrido, son los que sí tienen componente en la dirección de propagación tanto en el campo eléctrico como en el magnético.

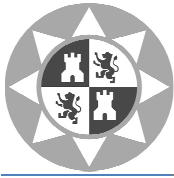
En guías de onda rectangulares el modo fundamental es el $TE_{1,0}$ y en guías de onda circulares es el $TE_{1,1}$. El ancho de banda de una guía de onda viene limitado por la aparición de modos superiores. En una guía rectangular, sería el $TE_{0,1}$ [4].

2.2.3 Aplicador de Microondas.

Se entiende por aplicador (o cavidad) de microondas aquella parte del sistema en la cual se introduce la muestra a ser calentada, es una estructura metálica que permite confinar la energía de microondas junto con el material a calentar y que es responsable de la eficiencia del calentamiento de la muestra.

Los agitadores de ondas se encuentran cerca del punto donde la guía de ondas se abre a la cavidad del horno y evitan el calentamiento desigual del alimento cuando chocan las ondas. El agitador consiste en una pieza metálica de forma irregular que gira lentamente de modo que refleje las microondas en direcciones diferentes, esto hace que los nodos se muevan de lugar en lugar dentro de la cavidad del horno para producir una distribución de energía más uniforme.

El diseño del aplicador de microondas es fundamental para conseguir un proceso de calentamiento eficiente y eficaz tanto en términos de energía como en la consecución de un producto de calidad elevada.



2.3 Ejemplos de aplicaciones industriales de microondas.

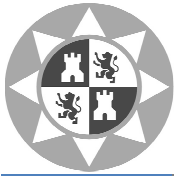
Las microondas ocupan el espacio del espectro electromagnético que va desde las radioondas VHF hasta el infrarrojo, y sus aplicaciones se pueden clasificar en dos categorías dependiendo del modo en el que es utilizada las ondas para transportar información; aplicaciones con modulación de la señal y aplicaciones sin modulación de la señal.

La primera categoría incluye sistemas de comunicación terrestre y satélite, radar, radioastronomía, termografía por microondas y medida de permitividad de los materiales. En todos los casos citados, el sistema de transmisión incorpora un receptor cuya función es extraer la información que de alguna forma modula la señal de microondas.

En la segunda categoría no hay modulación de la señal y la onda electromagnética interacciona directamente con ciertos líquidos o sólidos conocidos como lossy dielectrics de entre los cuales el agua tiene un interés especial. En esta categoría las microondas son utilizadas en procesos industriales para secar, hornear, cocer, pasteurizar, esterilizar, fundir, polimerizar, vulcanizar y otros procesos en los cuales la aplicación está en diferentes fases de desarrollo y se encuentran en un nivel inferior en la escena de producción industrial. En el siguiente punto se explicará más detenidamente los principales usos industriales de las aplicaciones de microondas sin modulación de la señal.

El calentamiento con microondas como un proceso industrial es una técnica que se concibió originalmente hace cerca de cuarenta años. Su adopción vino a competir con los métodos de calentamiento convencionales, lo cual provocó el interés de algunos investigadores para implementar la técnica de calentamiento con microondas en diversas aplicaciones industriales.

Es una técnica fundamentalmente nueva, pero tiene una limitante, y es que sólo ciertos materiales absorben la energía proveniente de las microondas. La transferencia de calor en un sistema de microondas se manifiesta en forma de calor propio del material y por la naturaleza del fenómeno de absorción de microondas el calentamiento de los materiales es totalmente diferente de los mecanismos convencionales ya que la energía microondas se deposita a través de todo el volumen del material más que por conducción térmica que se lleva a cabo desde la superficie hacia el interior [5].



Muchos procesos industriales involucran una o más fases de secado de productos, lo cual a menudo eleva el costo de producción. Las microondas ofrecen una de las alternativas más viables en términos de ahorro de energía, y sus principales ventajas son:

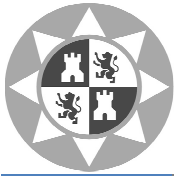
- Rápido calentamiento en el volumen.
- Evitar zonas de sobrecalentamiento.
- Disminución de costos de operación y de energía.

2.3.1 Procesado de cerámicos.

La aplicación de las microondas al procesado de cerámicos aparece durante los años 60 y 70 orientada únicamente al secado de los mismos. Así mismo, se reportan trabajos de calentamiento de cerámicos a mediados de los 80 y en los 90 se han dedicado numerosos esfuerzos para explorar nuevas rutas de procesamiento de acuerdo a la aplicación de los materiales. Es decir que conforme las exigencias de desempeño aumentan, se deben diseñar nuevas vías de producción para los nuevos materiales que las cumplan y, para el caso de los procesos que se llevan a cabo a alta temperatura, se traduce a la búsqueda en el incremento de la eficiencia y control del calentamiento.

Algunas de las hipótesis por las cuales se ha dado un crecimiento en el interés de usar microondas para el procesado de cerámicos son:

- Rapidez interna de calentamiento.
- Calentamiento selectivo.
- Mejora de calidad y propiedades.
- Precisión y control de calentamiento.
- Capacidades de procesamiento no posibles por métodos convencionales.
- Ahorros en costos (tiempo y energía).



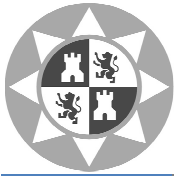
El procesamiento de materiales por microondas da la oportunidad de aprovechar las propiedades físicas de estos, además de que es una alternativa para suministrar energía a materiales que son difíciles de procesar y que sean buenos absorbedores de microondas. Dado que la energía se aplica directamente al material se obtienen ventajas económicas debido al ahorro de energía y tiempo, así como da la oportunidad de producir materiales nuevos y microestructuras que no pueden ser obtenidos por otros métodos.



Figura 2. 5 Horno de sinterización industrial (T^a Max 1300 °C y Frec 2.45Ghz \pm 25MHz)

La manufactura de productos cerámicos como ladrillos, alfarería, refractarios y cerámicos industriales se lleva a cabo a temperaturas superiores a 800°C. La absorción volumétrica de la energía de microondas hace posible un sintetizado más rápido que en un horno convencional. Esto permite producir un cerámico con grano fino y microestructura uniforme, el cuál puede ser más duro y menos quebradizo que los cerámicos actuales [6].

El sinterizado es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas. Implica calentar a una temperatura elevada en un ambiente controlado, se presenta cierta contracción durante el proceso. Esta operación produce la dureza y la resistencia de la pieza de cerámico, esta mejora de propiedades se debe al desarrollo de una liga resistente entre las partículas de óxido complejo en la cerámica y una reducción de porosidad.



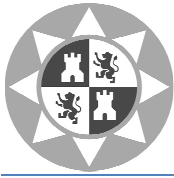
En los últimos años el grupo de investigación de electromagnetismo y materia (GEM) ha desarrollado numerosas investigaciones con el objetivo de transferir la tecnología de calentamiento por microondas a los procesos industriales. Un ejemplo de estos estudios lo tenemos en la industria del mármol.

Para hacer más atractiva la losa de mármol así como para dotarla de mayor resistencia frente a golpes y fracturas no deseadas se aplica al mármol unas resinas en su superficie. Dichas resinas deben ser calentadas para que adquieran su dureza y resistencia final en lo que se denomina proceso de polimerización o curado. Actualmente los procesos de curado tradicionales aplicados en esta industria duran unas dos horas para hornos convencionales de gas, lo cual produce cuello de botella en su proceso de producción. Gracias a un complejo estudio que abordaba la caracterización dieléctrica de los materiales empleados, simulaciones electromagnéticas así como la realización de numerosas pruebas experimentales, se consiguió un nuevo procedimiento industrial.

Gracias a este horno de microondas se ha podido reducir el tiempo de curado de las cubiertas de resina desde 2 horas a tan sólo 1 minuto y 20 segundos. Actualmente esta tecnología se ha protegido de forma conjunta por el GEM y el Centro Tecnológico del Mármol (CMT) a través de una patente mundial [7].



Figura 2. 6 Horno de microondas para el curado de las cubiertas de resina en el mármol.



2.3.2 Industria alimentaria.

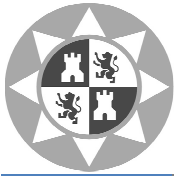
El tratamiento térmico de alimentos con microondas se conoce desde finales de 1940, pero no fue hasta los años 60 cuando los microondas adquirieron popularidad, en especial en EEUU, donde se empezaron a utilizar en el ámbito doméstico. Desde entonces se han desarrollado diversos equipos industriales que han ampliado enormemente el rango de aplicación de las microondas en alimentos, así, las microondas se han utilizado durante los últimos años en aplicaciones como el proceso de secado durante la fabricación de pasta, el escaldado de vegetales y la pasteurización de alimentos envasados.

Quizás el uso industrial más exitoso es la utilización de las microondas para elevar la temperatura de piezas congeladas de carne, pescado, aves, vegetales y frutas. En la actualidad, en EEUU existen más de 400 plantas que trabajan con este fin.

Esta aplicación es particularmente adecuada en el caso de piezas grandes de carne y pescado. Durante este proceso, piezas que se encuentran a -20°C han de pasar a -5 o -2°C , con el objetivo de facilitar, así, su troceado o fileteado para su posterior empaquetado y comercialización. Tradicionalmente, el proceso se llevaba a cabo dejando los productos en cámaras climáticas durante varios días, lo cual provocaba pérdidas de líquidos como sangre y soluciones de proteínas, mermándose de forma importante su calidad. Sin embargo, cuando se utilizan las microondas para este fin, el proceso es muy rápido. Por ejemplo, en piezas de 10-40 kg se consigue alcanzar la temperatura requerida en 5-10 minutos.

Los secadores convencionales de pastas alimenticias tienen que calentar el producto durante un tiempo elevado (unas diez horas), con la desventaja añadida de que ocupan un gran volumen y por tanto es difícil realizar en ellos un control bacteriológico exhaustivo sin un elevado incremento en el coste de producción. El secado por radiación de microondas no sólo se puede hacer en menor tiempo y espacio, sino que también permite realizar el proceso a temperaturas muy superiores sin correr el riesgo de agrietar la superficie de la pasta [3].

El secado a temperaturas altas tiene la ventaja de que genera microporos en la pasta durante la evaporación del agua, los cuales permiten al consumidor realizar posteriormente la cocción en menor tiempo.



En los últimos años se ha investigado más a fondo las posibles aplicaciones de microondas en el área de alimentos, principalmente como tratamiento inhibidor de microorganismos patógenos y como procesos de cocimiento de alimentos. Los factores más atractivos del uso de microondas como tratamiento térmico son la facilidad de uso, la rapidez de tratamiento, el alcance de altas temperaturas en tiempos cortos y la capacidad de tratar alimentos empacados para evitar contaminación. Los flujos rápidos de calentamiento hacen de las microondas una herramienta única para muchas aplicaciones industriales como la descongelación, incremento de temperaturas, blanqueado, cocimiento, deshidratación, esterilización y pasteurización. La propiedad de penetración en ciertos materiales de las microondas provee la oportunidad de reducciones importantes en los tiempos de proceso en la industria, incluso permiten una disminución del tiempo en relación 10 a 1, asimismo los procesos por microondas pueden demandar requerimientos de energía mucho menores a los de un proceso convencional.

Del mismo modo, en la industria láctea, las microondas se utilizan también en el tratamiento de mantequilla congelada, que debe mantenerse congelada a muy baja temperatura hasta su troceado y posterior comercialización para evitar el desarrollo de rancidez. Un método eficaz para elevar la temperatura de la mantequilla y, así, facilitar su troceado, es el tratamiento con microondas.

En el caso de la aplicación de las microondas en alimentos envasados, también se han dedicado muchos esfuerzos en el desarrollo de diferentes tipos de envases específicos para el tratamiento con microondas. Dependiendo de la finalidad del calentamiento, existen envases pasivos (vidrio, cerámica, papel, cartón y plástico), que no interfieren con las microondas, y envases activos, que consisten en delgados fragmentos metálicos entre láminas de cartón o poliéster metalizado, que inciden en el calentamiento del alimento mejorando la uniformidad del mismo [2].

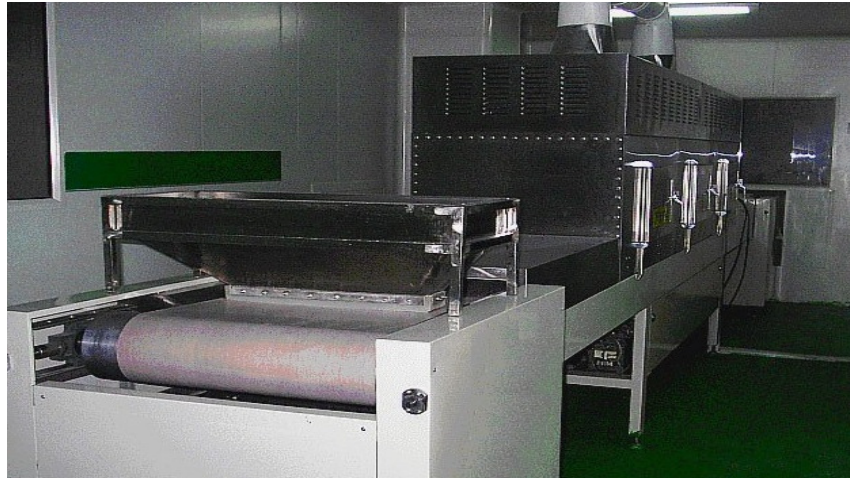
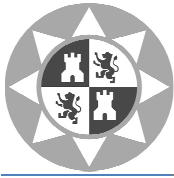


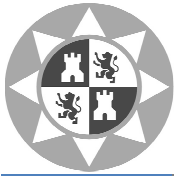
Figura 2. 7 Deshidratador de grano (Mod: LT-100KW 2450±50MHZ)



Figura 2. 8 Túnel de secado por microondas (Mod: MDS Drying S. 2450±50MHZ)

2.3.2 Agricultura y sector textil.

Desde principios de la década de los 70 a 80, se han utilizado con éxito en el tratamiento de suelos cultivables, con objeto de eliminar el crecimiento de hierbas indeseables antes de realizar la plantación de las especies de interés. También se han dedicado numerosos esfuerzos en el desarrollo de sistemas que permitan controlar plagas de insectos en las cosechas mediante radiación de microondas.

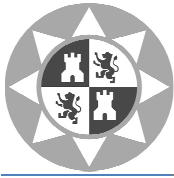


Esta aplicación es factible debido a que numerosos parásitos no toleran con facilidad subidas bruscas de temperatura, y tiene un gran atractivo por ser una alternativa con posibilidades de reducir el uso de los pesticidas químicos, los cuales presentan un grado de toxicidad muy superior a la radiación de microondas.

Seleccionando apropiadamente las frecuencias se puede alcanzar un cierto grado de selectividad en el calentamiento de un insecto adulto o una larva frente a la especie vegetal que se desea proteger. Algunos estudios han revelado que las frecuencias en el rango de 10-100Mhz pueden ser más eficaces y selectivas que las superiores a 1Ghz en la desinsectación de cosechas de cereales. La radiación de microondas todavía es más costosa que los pesticidas en el tratamiento de grandes extensiones de terreno para el cultivo. No obstante, el desarrollo de la tecnología de microondas continuamente revierte en un mayor abaratamiento de la instrumentación de alta potencia, lo que permite aventurar que las microondas pueden hacerse muy populares para este tipo de aplicaciones en un futuro no muy lejano [3].



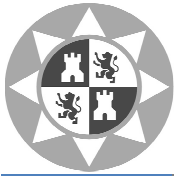
Figura 2. 9 Equipo para desinsectación de grano (Mod: MDF-N 60KW 2.45GHz±25MHz)



En la industria del cuero, el secado es una etapa fundamental en el acondicionamiento final de la piel. Actualmente se emplean sistemas de secado al vacío o técnicas de convección para reducir el contenido de humedad pero la ineficacia mostrada por estos métodos reduce la flexibilidad de la producción frente a la demanda del mercado. La energía de microondas es la alternativa más viable, en términos de eficiencia energética, a las técnicas convencionales, y presenta ventajas adicionales como una distribución de humedad más uniforme y una mayor calidad final en la piel [8].



Figura 2. 10 Túnel microondas para secado de cuero (GEM)



Capítulo 3. Escenario experimental.

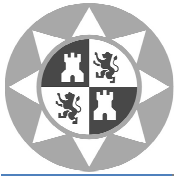
3.1 Simulador CST Microwave Studio.

CST Microwave Studio es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en 3D de componentes de alta frecuencia basado en el método de las diferencias finitas. Es un programa de pago de la empresa CST (Computer Simulation Technology), que se dedica a proporcionar software para el diseño electromagnético en todas las bandas de frecuencia. Plantea una división de la región bajo estudio en una malla de nodos, para posteriormente realizar una aproximación de la ecuación diferencial dentro de la región por una diferencia finita equivalente. Ésta relaciona la variable dependiente en el punto de la región de estudio con sus valores en los puntos colindantes. La solución de las ecuaciones de diferencias finitas la realiza sujeta a las condiciones de contorno prescritas y a las condiciones iniciales. Sus aplicaciones abarcan desde comunicaciones móviles, diseño sin hilos e integridad de la señal, hasta diseño y análisis de campos electromagnéticos en general.

Con este software se pueden realizar diferentes tipos de simulaciones:

- Transient Solver
- Frequency domain Solver
- Eigenmode Solver
- Resonant solver
- Integral Equation Solver
- Asymptotic Solver

El simulador utilizado en el presente proyecto ha sido Transient Solver, el cual es un simulador electromagnético 3D de propósito general que proporciona la propagación del campo bajo estudio en el dominio del tiempo. El módulo Transient Solver es la herramienta más flexible del programa y permite simular la mayoría de problemas electromagnéticos. Dispone de una interfaz gráfica muy potente que permite genera todo tipo de superficies y volúmenes, pudiéndose combinar de forma booleana para generar nuevas formas según convenga. Una vez generada la estructura el programa nos genera un fichero .cst y al finalizar la simulación crea una carpeta con los resultados obtenidos.



El CST Microwave proporciona una interfaz intuitiva cuya ventana principal se puede ver en la siguiente figura:

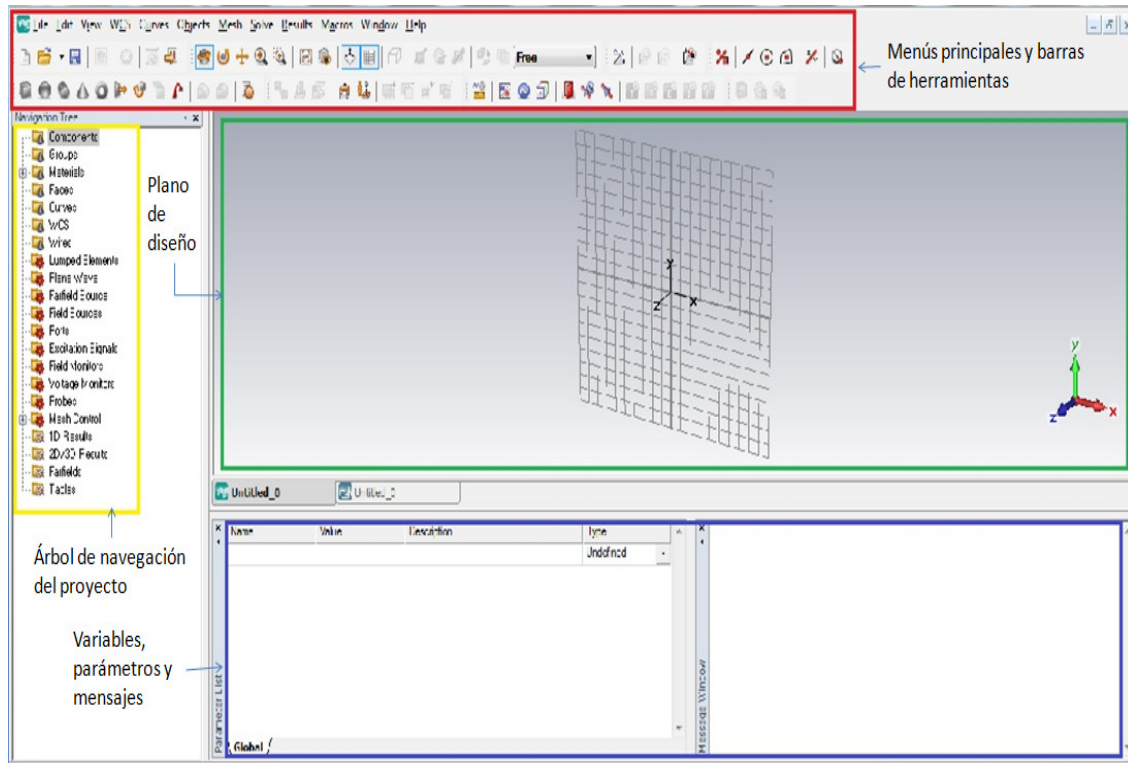
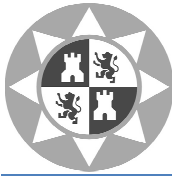


Figura 3. 1 Ventana principal de Microwave CST Studio.

La ventana principal del programa, está dividida en cuatro partes, en la primera de ellas, situada en la parte superior de la pantalla, se encuentran los menús principales y las barras de herramientas de acceso rápido a las distintas funciones del programa. La segunda parte, se encuentra a la izquierda, y muestra un árbol de navegación del proyecto, que permite acceder a los distintos componentes, materiales y resultados de simulación, entre otros. En la parte central derecha encontramos el plano de diseño en el que se crean las estructuras a simular. Por último, en la parte inferior podemos definir parámetros de diseño y leer cualquier mensaje relativo a la simulación. No se va a realizar la descripción detallada de los elementos y funcionalidades de la interfaz, ya que, el software proporciona un manual de usuario muy extenso y útil.

Todos los diseños creados en este proyecto se han realizado mediante interfaz gráfica, pero también se puede realizar por medio de macros de diseño. El programa registra todas las acciones de diseño realizadas en un historial que permite, además de ver los distintos pasos dados a la hora de diseñar, ver el código asociado a cada uno de estos pasos.



Las macros de diseño, codificadas mediante Visual Basic, contienen el código de todo el proceso de diseño y simulación de la estructura bajo estudio. Las macros permiten interactuar con otros programas, como Matlab, muy útil a la hora de optimizar diseños, obtener gráficos, etc. A continuación se van a describir algunas de las macros VBA generadas por el propio CST al crear parámetros y materiales necesarios para realizar el diseño:

Para definir las principales unidades en las que se va a trabajar:

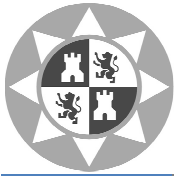
```
With Units
.Geometry "cm"
.Frequency "GHz"
.Time "s"
.TemperatureUnit "Celsius"
End With
```

Para la creación de los materiales se indicó su constante dieléctrica, el tipo de material, el color, etc.. El siguiente fragmento de código muestra como se genera en código VBA:

```
With Material
.Reset
.Name "NombreMaterial"
.Type "TipoMaterial"
.Colour (ValorRojo, ValorVerde, ValorAzul)
.Epsilon (ValorEpsilon)
.Mue (ValorMue)
.Kappa (ValorKappa)
.TanD (ValorTanD)
.Rho (ValorRho)
...
.Create
End With
```

Las opciones que puede tomar el campo “TipoMaterial” son: “PEC” (conductor eléctrico perfecto), “Normal”, “Anisotropic”, “Lossy Metal”, etc..

Las variables Epsilon, Mue, Kappa, TanD, Rho etc.. son valores propios de cada material.



Para el diseño de los componentes de la estructura, se debe indicar las dimensiones y el material de los que está compuesto:

```
With Brick
.Reset
.Name "NombreComponente"
.Component ("TipoComponente")
.Material "NombreMaterial"
.Xrange (Xmin, Xmax)
.Yrange (Ymin, Ymax)
.Zrange (Zmin, Zmax)
.Create
End With
```

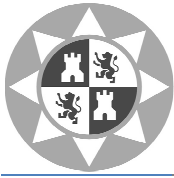
En el campo “NombreMaterial”, debe indicarse un material que haya sido definido previamente. Las dimensiones del componente vienen especificadas por las variables Xrange, Yrange y Zrange.

El objetivo de este apartado es obtener una visión general de la estructura y funcionamiento del software, aún faltaría definir numerosos componentes como por ejemplo; puertos, parámetros de la simulación, modificaciones en los componentes (operaciones booleanas, grosor..) etc.. para obtener el diseño final.

Finalmente, tras realizar la simulación, se pueden obtener muchos datos que pueden ser de gran ayuda, éstos pueden ser:

- Resultados en una dimensión, tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.

- Resultados en dos y tres dimensiones que permiten visualizar los resultados de los monitores previamente definidos. Dentro de estos resultados, se pueden utilizar las opciones que el programa contiene para el buen estudio del comportamiento del campo eléctrico.



Concretamente, para el estudio de las simulaciones realizadas durante el desarrollo de este proyecto, se utilizarán los siguientes resultados:

-1D Results/ |S|linear y |S|dB. Este parámetro nos muestra el coeficiente de reflexión de la estructura simulada.

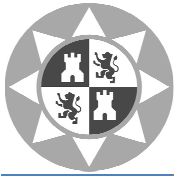
-2D/3D Results/E-Field($f=2.45$)[1]/Abs. Esta magnitud representa el módulo del valor del campo eléctrico obtenido. Seleccionando previamente un componente, se puede ver la distribución del campo que se ha producido en él.

3.2 Diseños realizados.

Antes de explicar los diseños planteados, para situar mejor el objetivo de este proyecto vamos a comentar que aplicaciones existen en la actualidad con un diseño similar al que se va a estudiar. Desarrollado en los últimos años, el VHM HEPHAISTOS (High Electromagnetic Power Heating Automated Injected STructures Oven System) es un sistema patentado internacionalmente y desarrollado en el Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) y el Instituto de Potencia Pulsada y Tecnología de microondas (IHM), y se caracteriza por una homogeneidad de campo muy alto. Por primera vez, las ventajas de la tecnología de microondas se han desarrollado con éxito a una tecnología industrialmente madura.

La homogeneidad alta de campo permite la fabricación de estructuras de alta calidad de CFC (Compuestos de Fibra de Carbono), tratar composites y/o secar materiales de lo más diverso mediante la tecnología de microonda. Mediante esta tecnología se puede endurecer productos de alta calidad y materiales como la fibra de carbono (por ejemplo, materiales compuestos reforzados CFC) que debido a su potencial para el uso de construcciones ligeras, se emplean en la ingeniería aeroespacial y, cada vez más, la industria del automóvil.

Se alcanzan ahorros energéticos mediante tiempos de ciclo más cortos y debido a que no existe pérdida de calor al no ser necesario calentar la cámara interna del horno, produciendo calentamiento específicamente en el material.



También se esperan obtener mejores propiedades mecánicas en los materiales curados por microondas, debido a un calentamiento más homogéneo frente a los hornos convencionales. Esta tecnología se extiende desde aparatos para laboratorio hasta una escala grande necesaria en la industria aeronáutica [9].

Principales características del sistema:

- Carcasa exterior cubierta con chapa de acero electro galvanizado RAL 9002.
- Cámara de trabajo de acero inoxidable.
- Ventilador para la refrigeración del magnetrón.
- Aberturas en ambas paredes laterales.
- Piezas de conexión para el aire de proceso, de suministro y de escape.
- Diseño hexagonal de la cavidad de microondas.

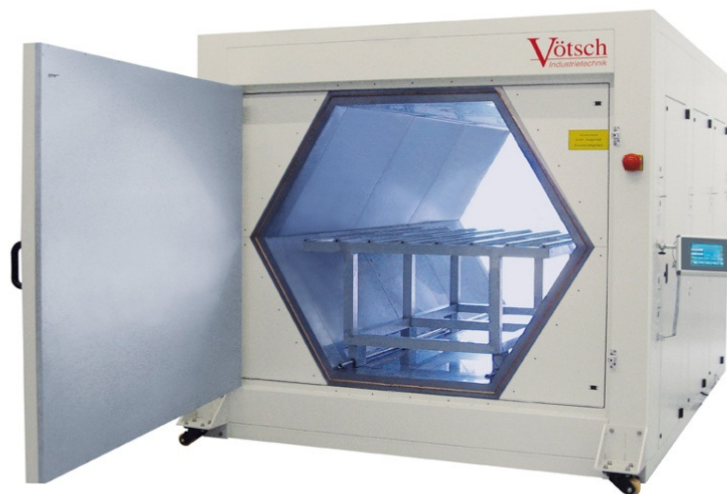
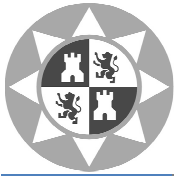


Figura 3. 2 Hephaistos Microwave Oven VHM 100/100.



La Figura 3.3 muestra la comparación entre la distribución de campo de un aplicador hexagonal y un aplicador cilíndrico.

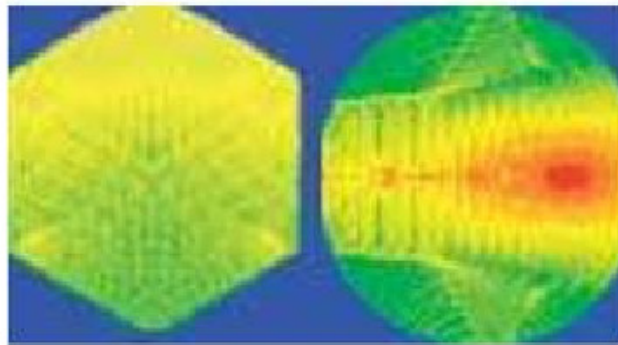


Figura 3. 3 Comparativa distribución de campo de un aplicador hexagonal y cilíndrico

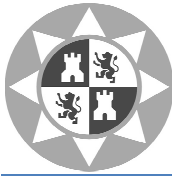
Una vez expuesto el objetivo de este proyecto, y antes de desarrollar los pasos dados para la creación de ambos diseños mediante el CST Microwave, se explica a continuación las diferencias físicas y numéricas entre ambos diseños.

Diseño cúbico:

Inicialmente se realizó una simulación en una cavidad de 60x60x60cm y una muestra en su interior de resina. Tras no obtener un buen resultado con el parámetro $|S|$ Linear, se fue aproximando el diseño ajustando las medidas hasta obtener un diseño adecuado en la frecuencia 2.45 Ghz cuyas medidas finales fueron 56.8x56.8x56.8cm.

<i>Lado del cubo</i>	56.8 cm
<i>Profundidad</i>	56.8 cm
<i>Volumen</i>	183250.432 cm ³
<i>Medidas del Puerto de alimentación</i>	4.3x8.6x1 cm
<i>Teflón</i>	30x36x0.5 cm
<i>Muestra</i>	26x28x2 cm

Tabla 3. 1 Medidas del diseño cúbico.



Diseño hexagonal:

Una vez obtenido el diseño cúbico óptimo, se trató de igualar lo máximo posible el volumen de ambas cavidades.

Mediante la fórmula;

$$V = A \times 56.8\text{cm}$$

y teniendo en cuenta que el área de un hexágono conociendo su lado es,

$$A = \frac{3 \times \sqrt{3}}{2} \times (L^2)$$

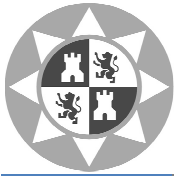
despejando L, obtenemos que el lado del hexágono es;

$$L = 35.23 \text{ cm.}$$

Al realizar la simulación del diseño Hexagonal con $L = 35.23\text{cm}$ y muestra de resina, se observa que no se consigue un buen resultado del parámetro $|S|$ Linear. Al igual que en el diseño cúbico se fue aproximando la cavidad ajustando las medidas hasta obtener un $|S|$ Linear adecuado en la frecuencia 2.45 Ghz, finalmente se obtuvo un lado de 35.694 cm.

<i>Lado del hexágono</i>	35.694 cm
<i>Profundidad</i>	56.8 cm
<i>Volumen</i>	188014.204 cm ³
<i>Medidas del Puerto de alimentación</i>	4.3x8.6x1 cm
<i>Teflón</i>	30x36x0.5 cm
<i>Muestra</i>	26x28x2 cm

Tabla 3. 2 Medidas del diseño hexagonal.



3.2.1 Diseño cúbico.

Comenzaremos definiendo paso por paso los principales componentes, operaciones y definiciones para el diseño cúbico, que es el más simple para el aplicador de microondas.

Mediante el interfaz gráfico del CST Microwave, seleccionando el icono “Create Brick” de la barra de herramientas se genera el Cubo, especificando el tipo de material (“Vacuum”) y ajustando las medidas mediante las coordenadas en el código de VBA generado.

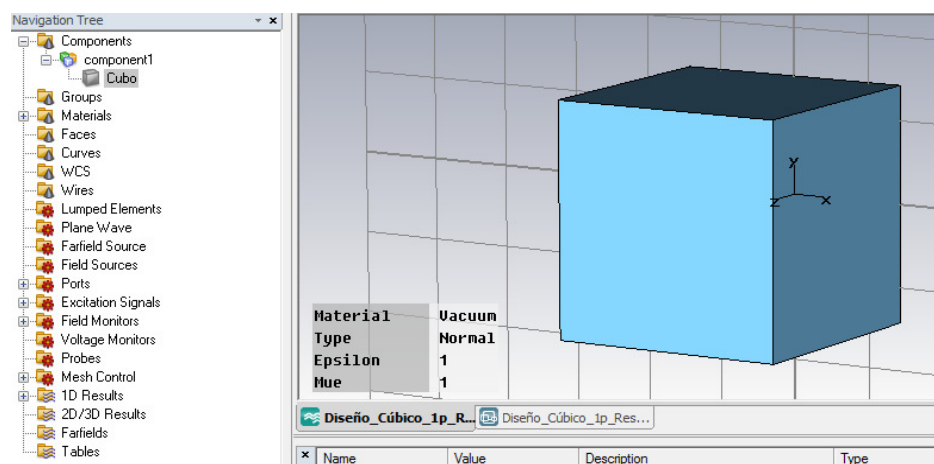


Figura 3. 4 Diseño cúbico

En segundo lugar creamos el puerto de alimentación, simplemente indicando las coordenadas y solapando su cara inferior con la cara superior del cubo. Mediante el icono Waveguide Port se selecciona la cara exterior y se indica la dirección del campo.

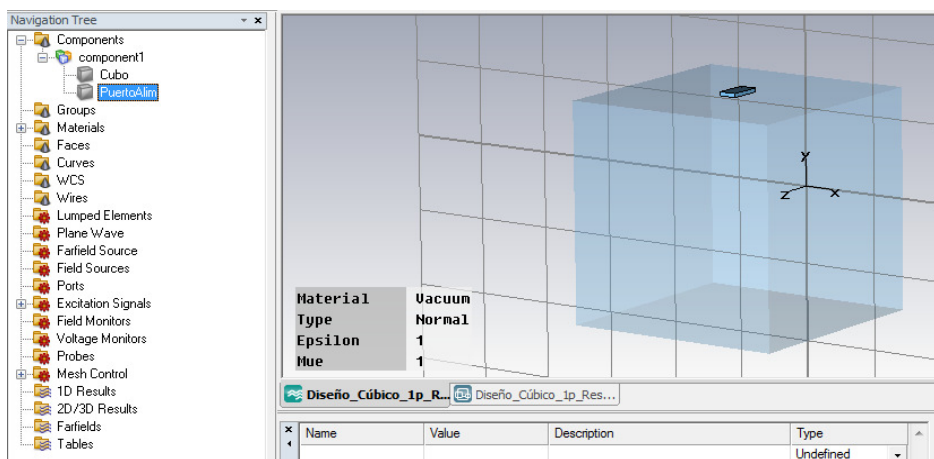
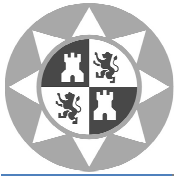


Figura 3. 5 Puerto de alimentación - Diseño cúbico



Para el diseño con tres guías de onda, se realiza la operación de copia de componente (de uno de los puertos ya previamente creados) y se selecciona la cara en la que se desea colocar, posteriormente se seleccionarán las caras y la dirección del campo mediante el icono “Waveguide Ports”.

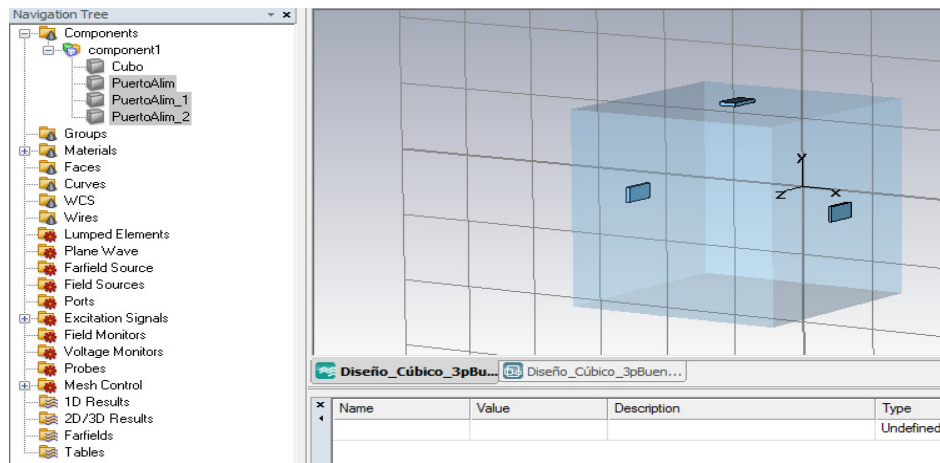


Figura 3. 6 Tres puertos de alimentación - Diseño cúbico

Una vez creado el cubo y el puerto de alimentación, se pasa a crear el brick Teflón. Cómo el resto de componentes se crea mediante el icono “Create brick” y se introducen sus coordenadas, en éste caso su cara inferior estará solapada con la cara inferior del Cubo. Su material ha sido definido mediante la librería propia del CST Microwave (tipo loss free). El Teflón actuará como plato para colocar sobre él la muestra a estudiar.

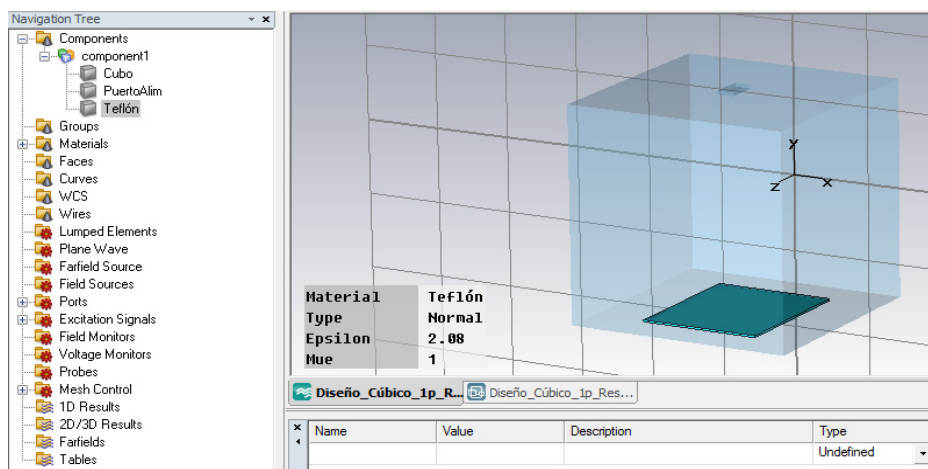
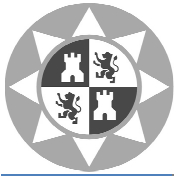


Figura 3. 7 Plato de teflón - Diseño cúbico



El último brick a crear es la Muestra, su cara inferior estará solapada con la cara superior del Teflón. Su material ha sido definido previamente indicando sus características y parámetros.

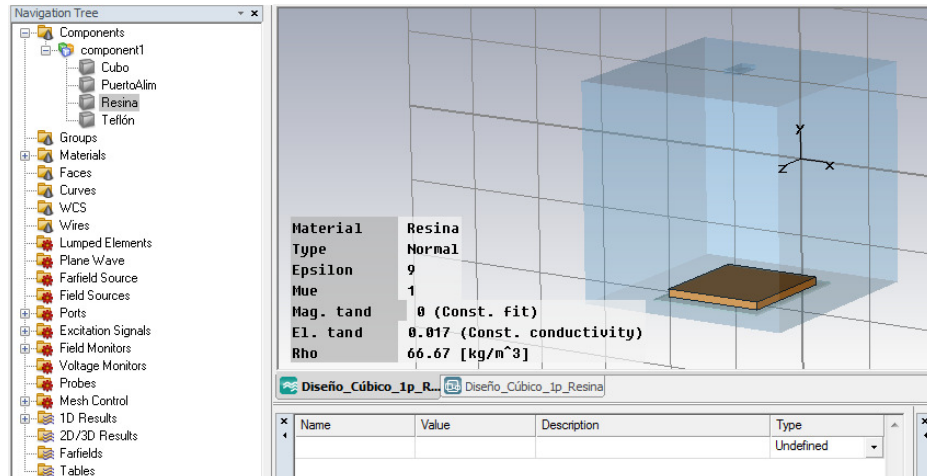


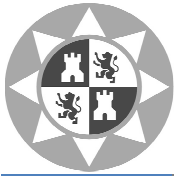
Figura 3. 8 Muestra - Diseño cúbico

Una vez creados todos los componentes de nuestro diseño, hay que relacionar mediante las operaciones booleanas cada uno de los bricks mediante el icono “boolean Insert”. Se definen también las unidades mediante el icono “Units”.

Dimensiones	Cm
Frecuencia	GHz
Tiempo	Segundos
Temperatura	Celsius

Tabla 3. 3 Unidades - Diseño cúbico

Se crea un “Field Monitor” indicando la frecuencia en la que se monitorizará la amplitud del campo eléctrico una vez finalizada la simulación. Para comenzar la simulación simplemente se accederá al icono “Transient Solver”. En la ventana de “Transient Solver Parameters” se mantendrá la precisión por defecto de -30 dB y en las opciones de simulación se seleccionarán los puertos que se excitarán durante la simulación. Para el diseño de tres puertos será necesario activar la opción de excitación simultánea para el correcto funcionamiento.



3.2.2 Diseño hexagonal.

En primer lugar se crea una nueva Curva, y tras calcular la medida del lado del hexágono ($L=35.694$), se calculan los puntos restantes.

```
With Polygon
.Reset
.Name "polygon1"
.Curve "curve1"
.Point "0", "30.934"
.LineTo "17.847", "30.934"
.LineTo "35.694", "0"
.LineTo "17.847", "-30.934"
.LineTo "0", "-30.934"
.Create
End With
```

El cálculo de las coordenadas exactas se ha obtenido partiendo de los puntos de un hexágono perfecto.

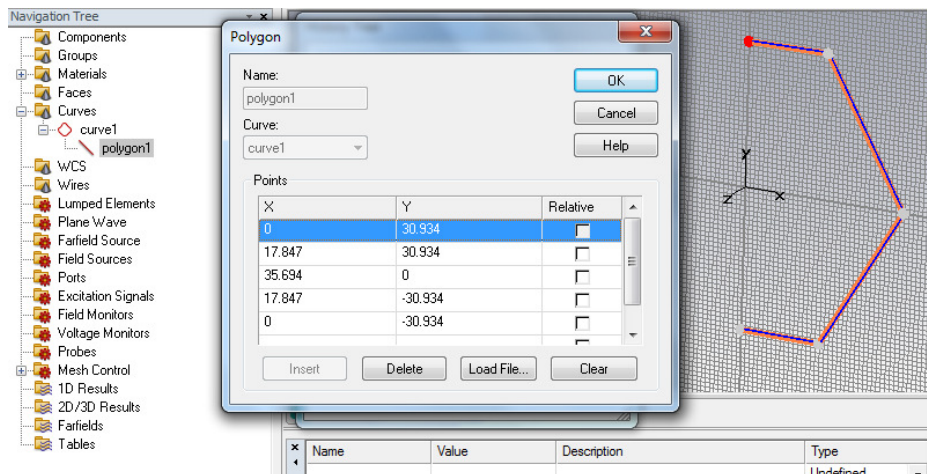
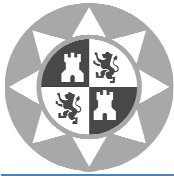


Figura 3. 9 Definición puntos hexágono



Una vez definidos los puntos sobre los cuadrantes inferior y superior derecho, se realiza una transformación de “espejo” sobre el plano X para definir el resto de puntos del polígono.

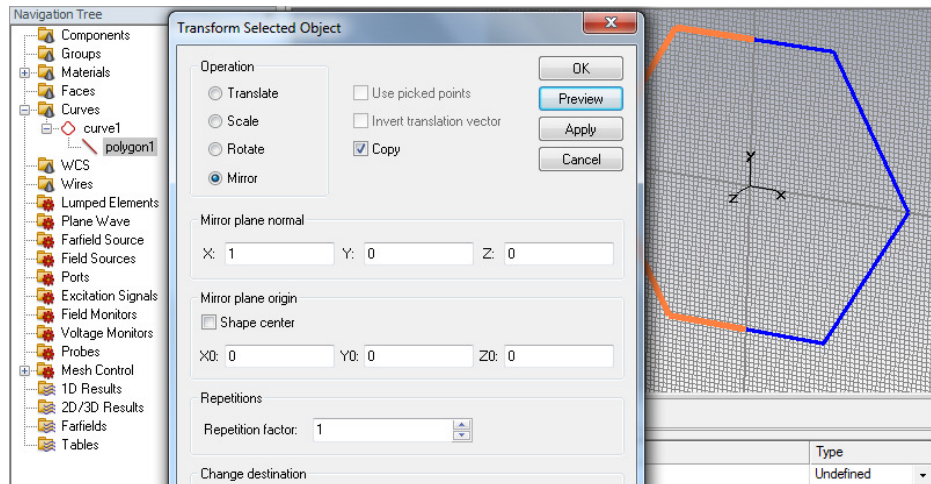


Figura 3. 10 Transformación espejo - Diseño hexagonal

Definidos todos los puntos del polígono se crea una cubierta plana mediante el icono “Cover Planar Curve”.

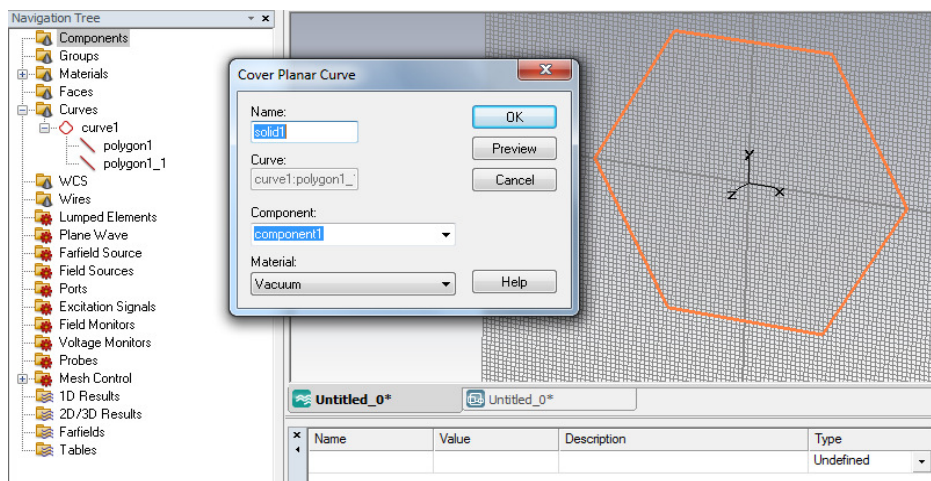
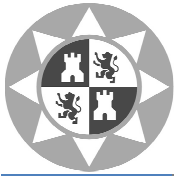


Figura 3. 10 Diseño cubierta hexágono



Partiendo de la cubierta hexagonal, con el icono “Thicken Sheet” se define el grosor del polígono a crear.

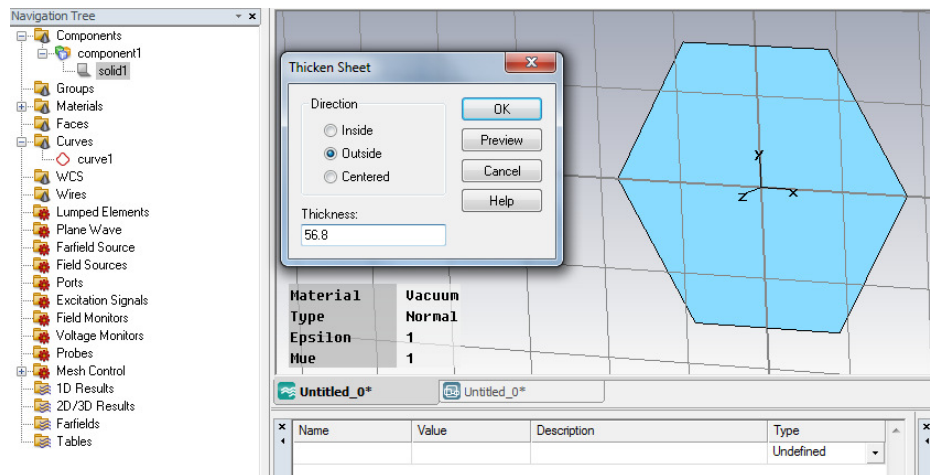


Figura 3. 11 Diseño grosor hexágono

Una vez definido por completo el diseño hexagonal, se añadirán como en el diseño cúbico el resto de componentes necesarios.

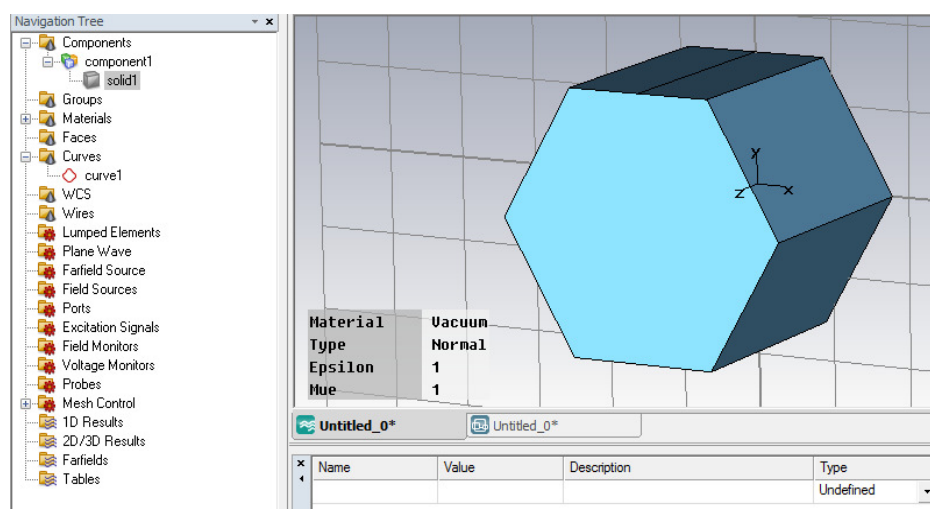
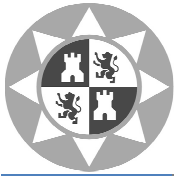


Figura 3. 12 Diseño hexagonal



Se diseña el puerto de alimentación indicando las coordenadas y solapando su cara inferior con la cara superior del hexágono. Mediante el icono “Waveguide Port” se selecciona la cara exterior y se indica la dirección del campo.

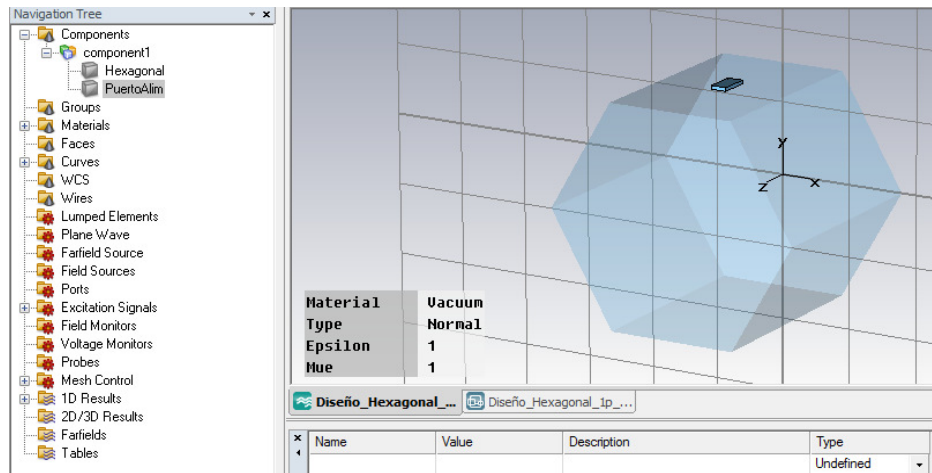


Figura 3. 13 Puerto alimentación - Diseño hexagonal

Para el diseño de 3 puertos, inicialmente se diseñaron como aparecen en la Figura 3.15, pero por restricciones del propio CST Microwave, es obligatorio que los puertos de guías de onda deben estar alineados con los planos de coordenadas cartesianas para realizar la simulación de tipo “transient solver”.

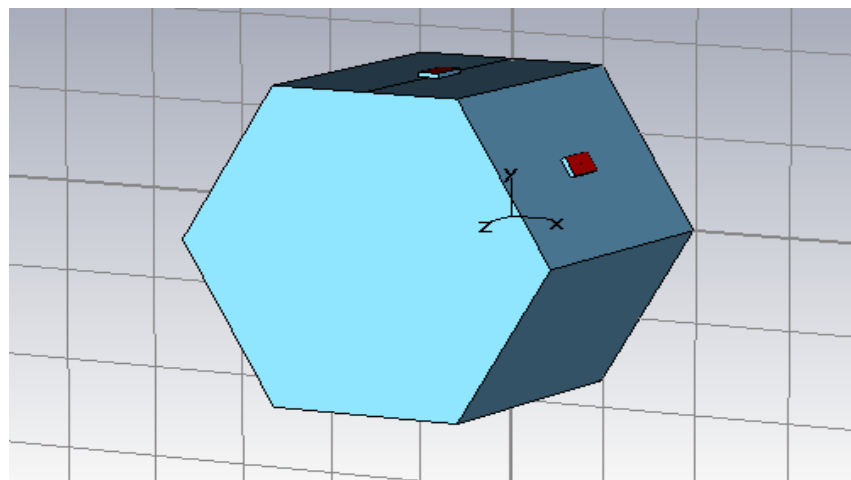
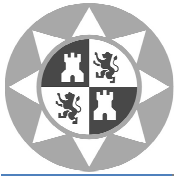


Figura 3. 14 Diseño erróneo de los puertos



Para solucionar el problema de los puertos, se crearon dos bricks correspondientes a los dos puertos laterales del hexágono y con la operación boolean insert shapes se unen con el resto del diseño. Por último se seleccionarán las caras y la dirección del campo mediante el icono “Waveguide Ports”.

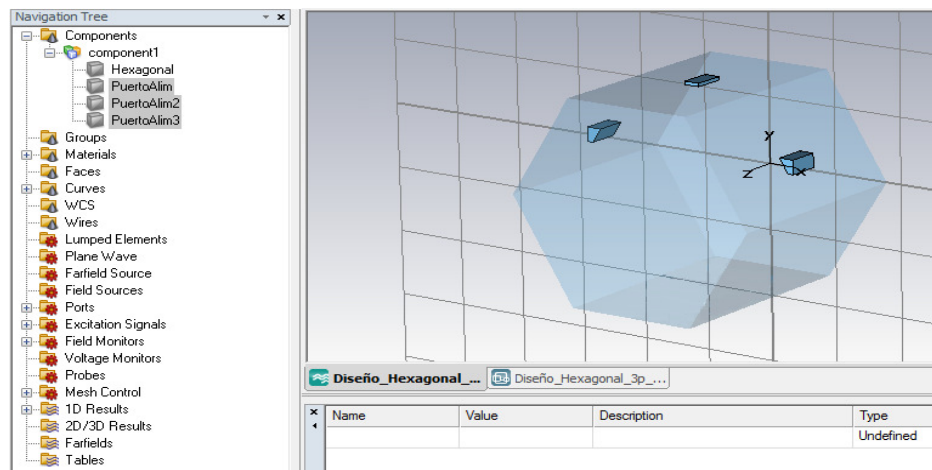


Figura 3. 15 Tres puertos de alimentación - Diseño hexagonal

Una vez creado el hexágono y el puerto de alimentación, se pasa a crear el brick Teflón. Cómo el resto de componentes se crea mediante el icono “Create brick” y se introducen sus coordenadas, en éste caso su cara inferior estará solapada con la cara inferior del hexágono. Su material ha sido definido mediante la librería propia del CST Mircrowave (tipo loss free). El Teflón actuará como plato para colocar sobre él la muestra a estudiar.

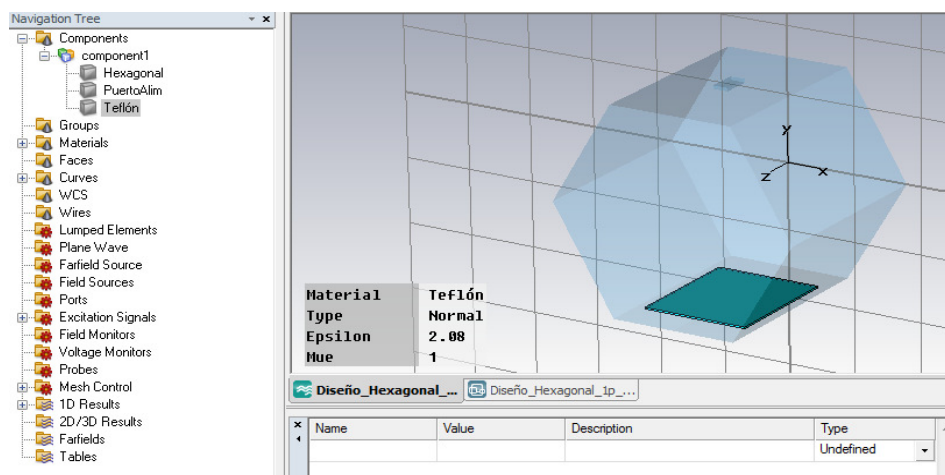
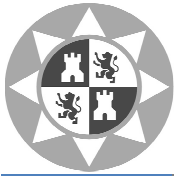


Figura 3. 16 Plato de teflón - Diseño hexagonal



El último brick a crear es la Muestra, su cara inferior estará solapada con la cara superior del Teflón. Su material ha sido definido previamente indicando sus características y parámetros.

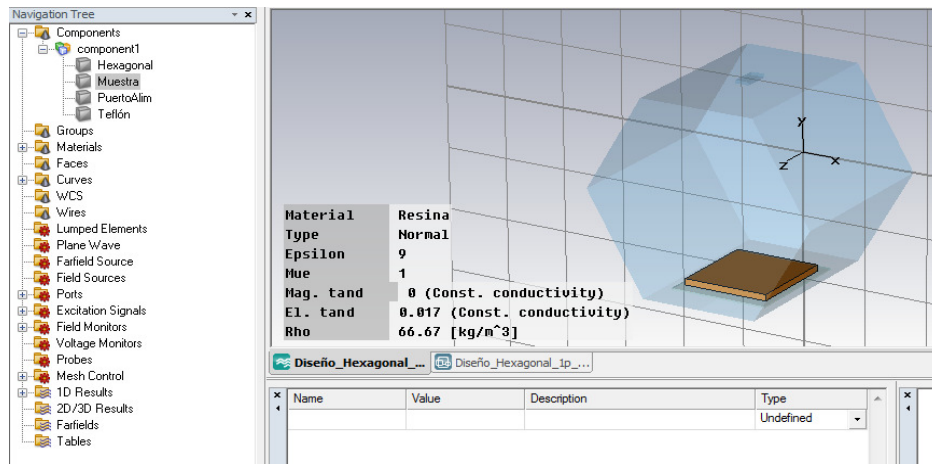


Figura 3. 17 Muestra - Diseño hexagonal

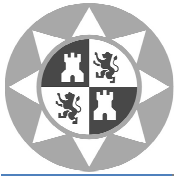
Al igual que en el diseño cúbico, una vez creados todos los componentes de nuestro diseño, hay que relacionar mediante las operaciones booleanas cada uno de los bricks mediante el icono “boolean Insert”.

Se definen también las unidades mediante el icono “Units”.

Dimensiones	Cm
Frecuencia	GHz
Tiempo	Segundos
Temperatura	Celsius

Tabla 3. 4 Unidades - Diseño hexagonal

Se crea un “Field Monitor” indicando la frecuencia en la que se monitorizará la amplitud del campo eléctrico una vez finalizada la simulación. Para comenzar la simulación simplemente se accederá al icono “Transient Solver”. En la ventana de “Transient Solver Parameters” se mantendrá la precisión por defecto de -30 dB y en las opciones de simulación se seleccionarán los puertos que se excitarán durante la simulación. Para el diseño de tres puertos será necesario activar la opción de excitación simultánea para el correcto funcionamiento.



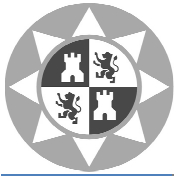
3.3 Muestras utilizadas y parámetros.

La capacidad de un material para calentarse en presencia de un campo de microondas está definida por su tangente de pérdidas dieléctricas: $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$. La tangente de pérdidas dieléctricas está compuesta de dos parámetros, la constante dieléctrica (o permitividad real) ϵ' , y el factor de pérdidas dieléctricas (o permitividad imaginaria) ϵ'' ; es decir, $\epsilon = \epsilon' - i \epsilon''$, donde ϵ sería la permitividad compleja. La constante dieléctrica (ϵ') determina qué cantidad de la energía incidente es reflejada y qué cantidad absorbida, mientras que el factor de pérdidas dieléctricas (ϵ'') mide la disipación en forma de calor, de energía eléctrica en el interior del material.

Para un aprovechamiento óptimo de la energía de las microondas, se debe combinar un valor moderado de ϵ' con valores elevados de ϵ'' (y por lo tanto valores elevados de $\tan \delta$), permitiendo convertir la energía de las microondas en energía térmica. Así, mientras que algunos materiales poseen un factor de pérdidas dieléctricas (ϵ'') poco elevado para permitir el calentamiento dieléctrico (transparentes a las microondas), otros materiales (la mayoría de los materiales de carbono), son excelentes absorbentes de microondas [10]. A continuación se especificarán los distintos tipos de muestras que se han utilizado para realizar cada una de las simulaciones durante el proyecto. En la siguiente tabla se muestran las propiedades dieléctricas de cada uno de los materiales:

	Densidad (kg/m ³)	Epsilon (ϵ')	Epsilon2 (ϵ'')	tanDE ($\tan \delta$)	CondE	frequDE	Mue
<i>Madera- Abedul</i>	650	2.13	0.0703	0.033	0.012	3	1
<i>Mármol</i>	2400	9	0.22	0.0244	0.0367	3	1
<i>Resina</i>	66.67	9	0.15	0.017	0.02	2.45	1
<i>Pasta-húmeda</i>	641	55	21	0.3818	2.862	2.45	1
<i>Maíz</i>	810	2.74	0.14	0.051	0.019	2.45	1
<i>Trigo</i>	790	2.42	0.05	0.020	0.0068	2.45	1
<i>Teflón</i>	2200	2.1	0	0	0	2.45	1

Tabla 3. 5 Propiedades dieléctricas de los materiales utilizados (*Physical properties of foods, Serpil Sahin, 2006*)



Capítulo 4. Resultados experimentales.

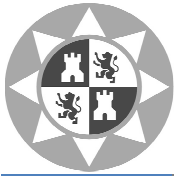
Una vez creados los cuatro diseños a estudiar mediante el CST Microwave Studio y de realizar la simulación para cada uno de ellos, se obtiene del CST un archivo ASCII con los resultados distribuidos en nueve columnas con el siguiente formato [x(cm) y(cm) z(cm) ExRe(V/m) EyRe(V/m) EzRe(V/m) ExIm(V/m) EyIm(V/m) EzIm(V/m)]. Es importante en el momento de importar, seleccionar adecuadamente el número de puntos necesarios para conseguir una mejor calidad en la representación además de aproximarse a las coordenadas que se quiere evaluar (superficie de la muestra).

Para la representación volumétrica (función slice), es necesario importar todos los puntos del campo eléctrico del diseño, no obstante, ha sido imposible seleccionar las coordenadas que coinciden exactamente con la superficie de la muestra a estudiar puesto que para escoger dichas coordenadas se debe de seleccionar un archivo excesivamente grande para ser usado en Matlab. Para conseguir la representación se ha diseñado la siguiente función:

representar_campo_slice: esta función almacena por columnas el archivo ASCII, comprueba si existen puntos con una distancia mayor de 0.5 mm inferior a la superficie de la muestra para no ejecutarse, sólo se ejecuta si encuentra puntos entre la cara superior de la muestra y 0.5 mm por debajo. Se calcula el módulo del campo eléctrico y la función pedirá por pantalla el número de la matriz tridimensional que se seleccionó a la hora de importar los datos (Nx,Ny,Nz) y la posición en cm del corte volumétrico que se quiere representar. Además calculará la media y la varianza del campo eléctrico de la muestra para cada uno de los diseños.

En cuanto a la representación de superficie (función surf), en el momento de importar se ha de seleccionar un plano sobre la superficie de la muestra mediante la opción “3D Fields on 2D plane” seleccionando el eje Y, y se obtendrán únicamente el campo sobre los puntos de ese plano. Para conseguir esta representación se ha diseñado la siguiente función:

representar_campo_surf: esta función almacena por columnas el archivo ASCII, calcula el módulo del campo eléctrico y en este caso solo será necesario introducir los valores de Nx y Nz al ser una matriz de dos dimensiones para realizar la representación. Tan solo se ha de introducir un valor mínimo y máximo para la escala de la representación.



4.1 Simulación del diseño cúbico.

4.1.1 Resultados diseño cúbico con una guía de onda.

4.1.1.1 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de resina.

Para cada diseño se ha representado el coeficiente de reflexión, la distribución del campo mediante un corte volumétrico y sobre la superficie, además de la media y la varianza del campo eléctrico sobre la muestra. En este caso el parámetro S1,1 nos muestra un sistema muy bien adaptado a 2.45GHz.

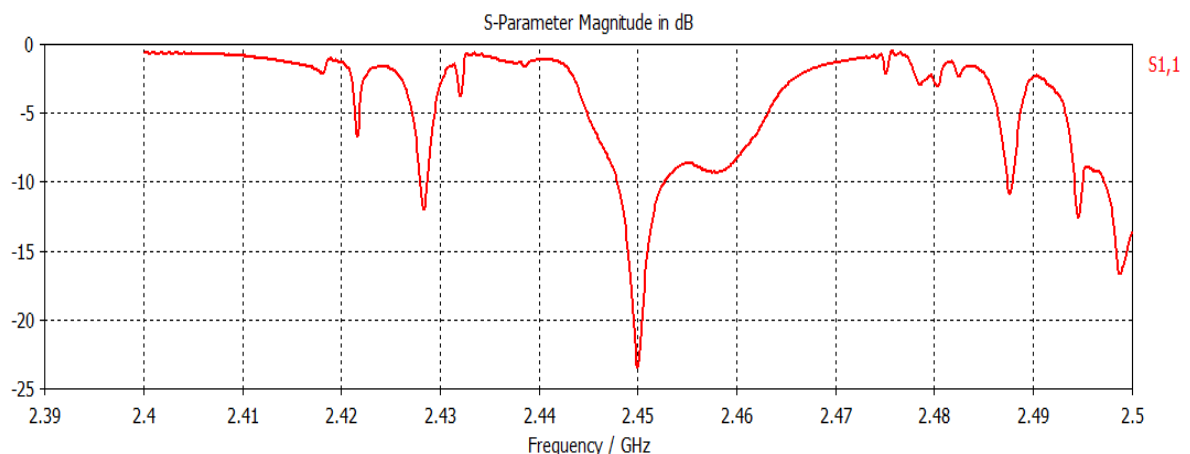


Figura 4. 1 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de resina

A continuación se muestra la imagen del material analizado en una imagen 3D de la pieza completa y en una imagen 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

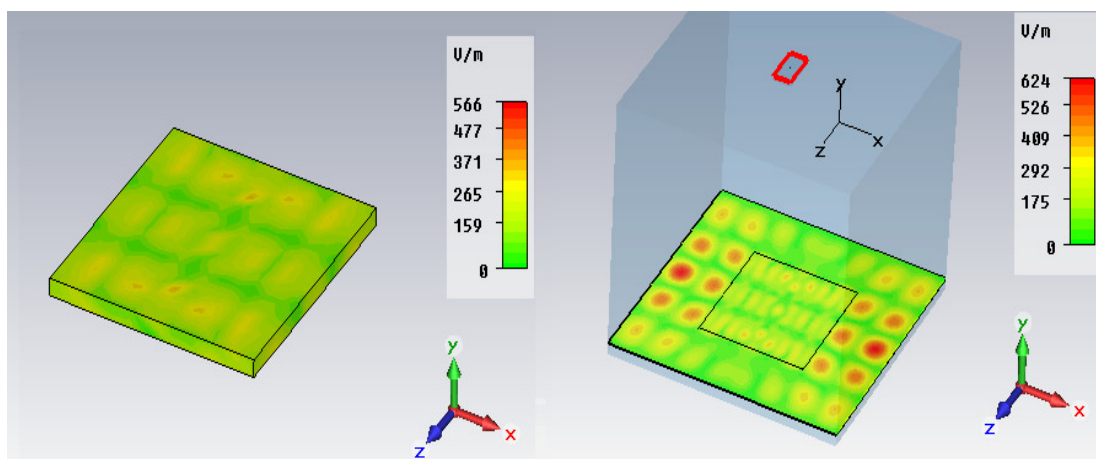
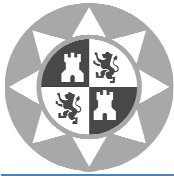


Figura 4. 2 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

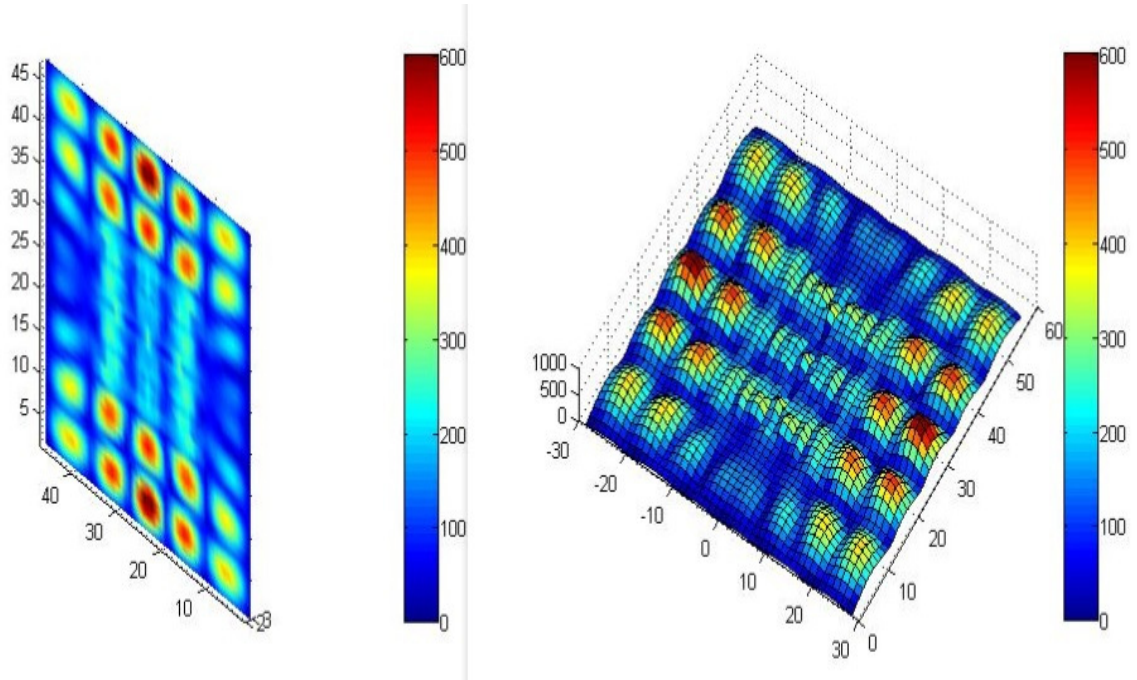
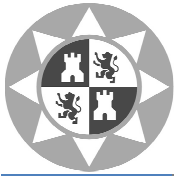


Figura 4. 3 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra:

<i>Muestra</i>	<i>RESINA</i>
<i>Media (mean E)</i>	173.2375
<i>Varianza (var E)</i>	3.8879e+03
<i>Valor Máximo E</i>	354.8

Tabla 4. 1 Parámetros calculados para diseño cúbico con una guía y muestra de resina



4.1.1.2 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de madera de abedul.

Para la muestra de madera de abedul se obtiene una mala adaptación de la cavidad según el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.45GHz.

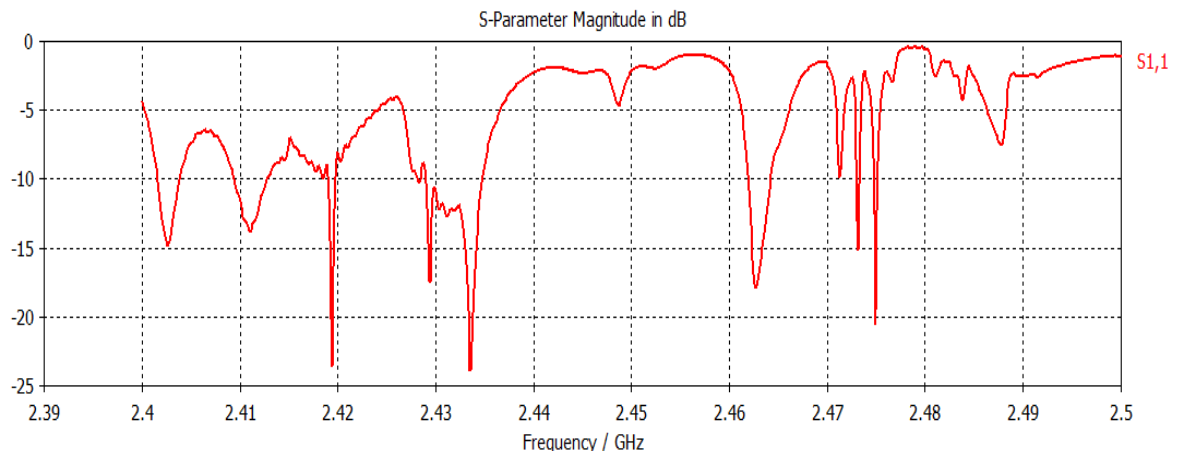


Figura 4. 4 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de madera de abedul

A continuación se muestra la imagen del material analizado en una imagen 3D de la pieza completa y en una imagen 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

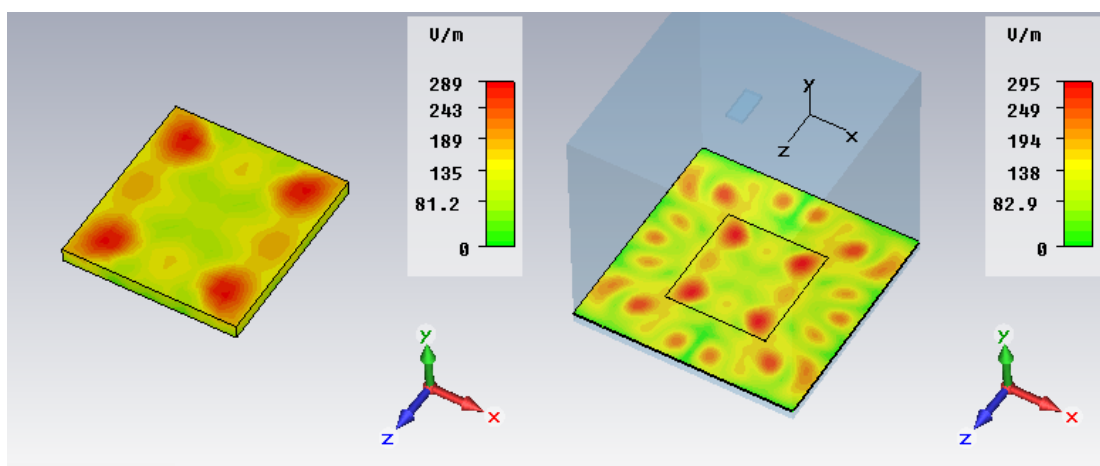
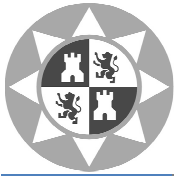


Figura 4. 5 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

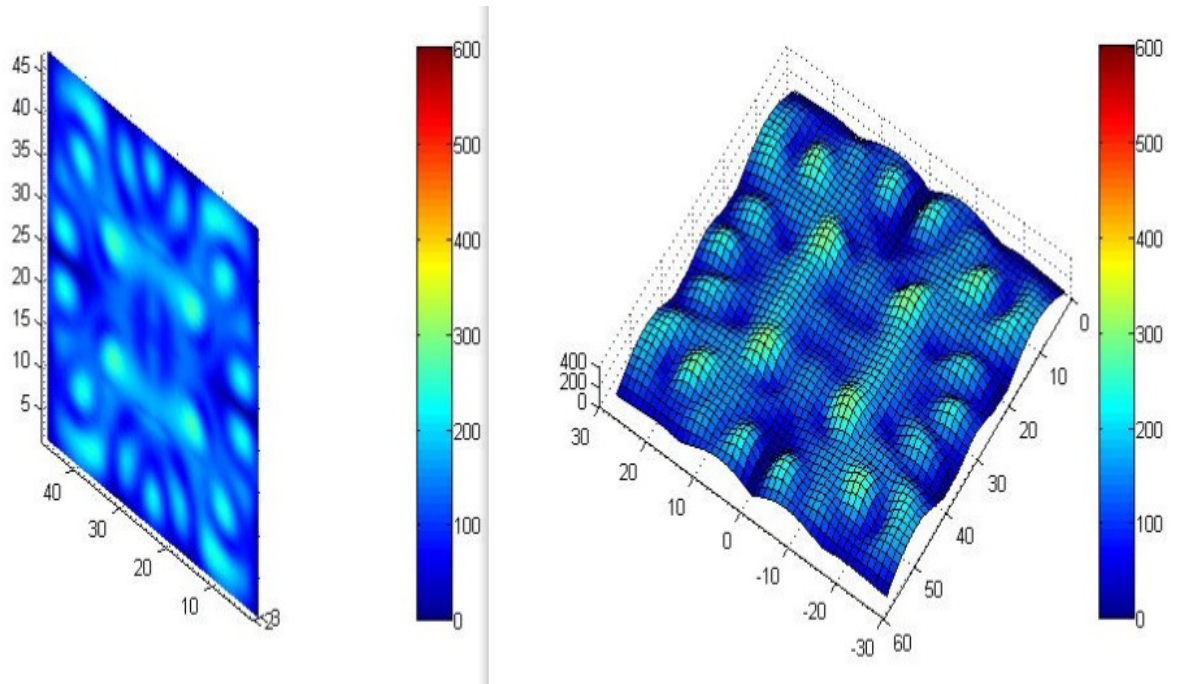
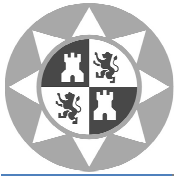


Figura 4. 6 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	<i>MADERA ABEDUL</i>
Media (mean E)	162.7307
Varianza (var E)	2.5539e+03
Valor Máximo E	296.3

Tabla 4. 2 Parámetros calculados para diseño cúbico con una guía y muestra de madera de abedul



4.1.1.3 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de mármol.

Para la muestra de mármol el coeficiente de reflexión muestra una buena adaptación del sistema a la frecuencia de 2.45GHz.

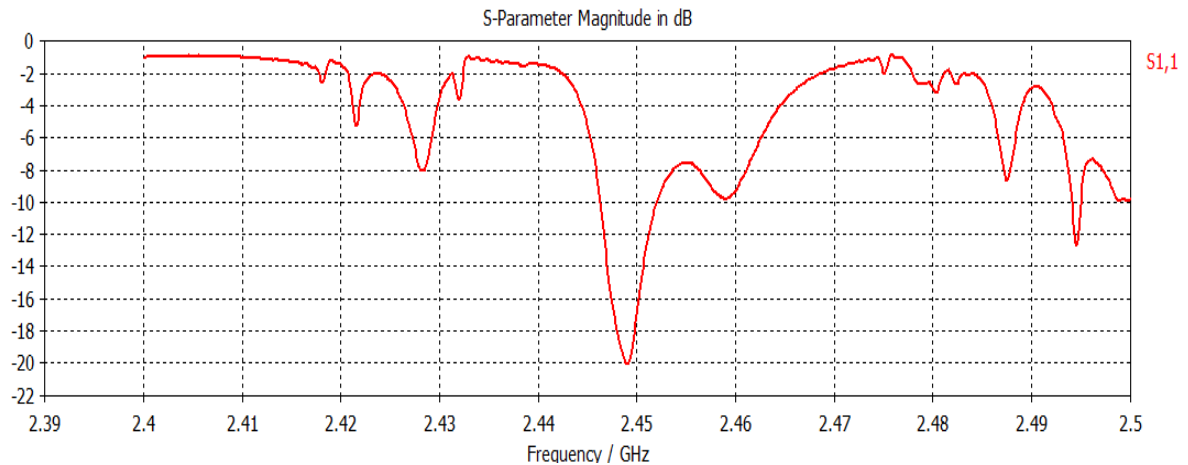


Figura 4. 7 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de mármol

A continuación se muestra la imagen del material analizado en una imagen 3D de la pieza completa y en una imagen 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

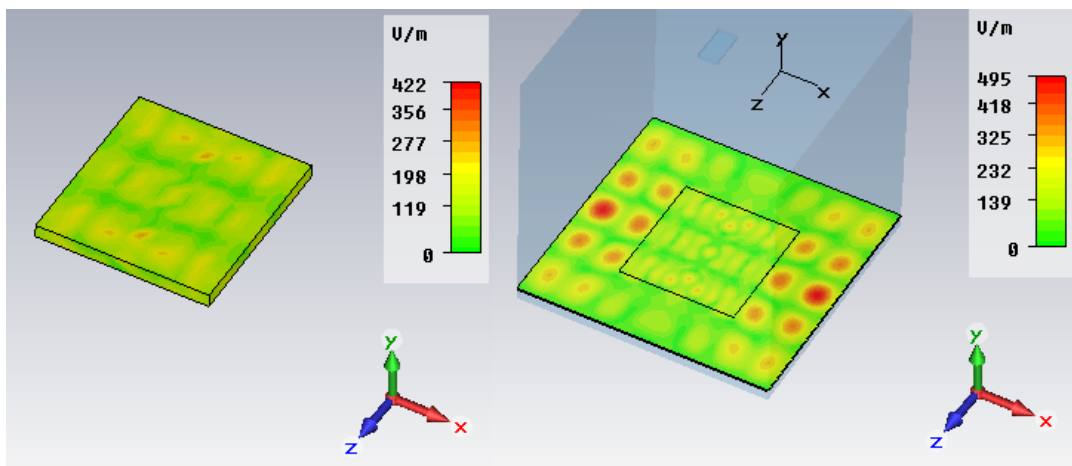
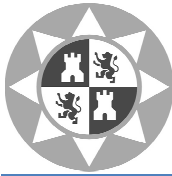


Figura 4. 8 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

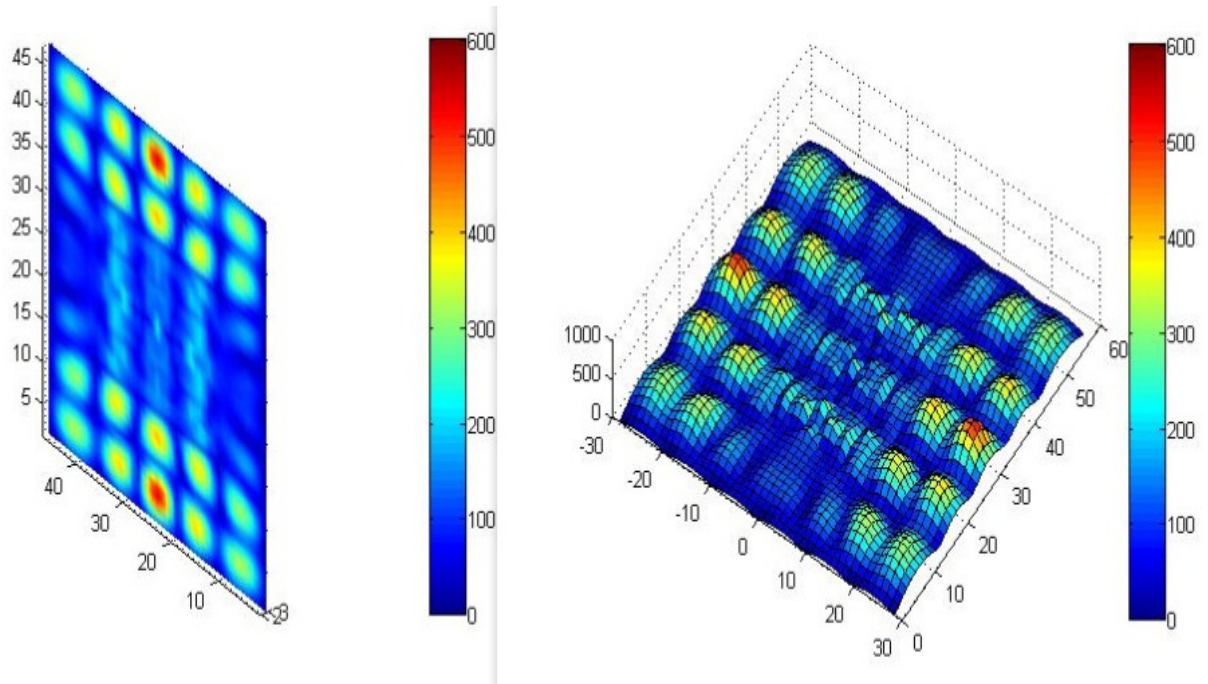
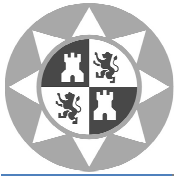


Figura 4. 9 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MÁRMOL
Media (mean E)	129.3787
Varianza (var E)	2.3525e+03
Valor Máximo E	289.8

Tabla 4. 3 Parámetros calculados para diseño cúbico con una guía y muestra de mármol



4.1.1.4 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de maíz.

Para la muestra de maíz el parámetro $S_{1,1}$ muestra un sistema mal adaptado a la frecuencia de 2.45 GHz.

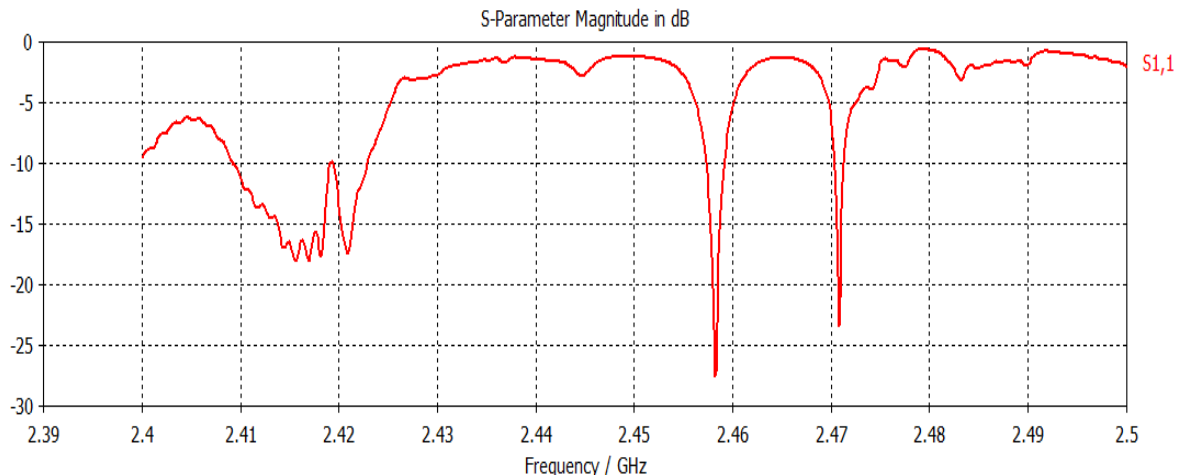


Figura 4. 10 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de maíz

A continuación se muestra la imagen del material analizado en una imagen 3D de la pieza completa y en una imagen 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

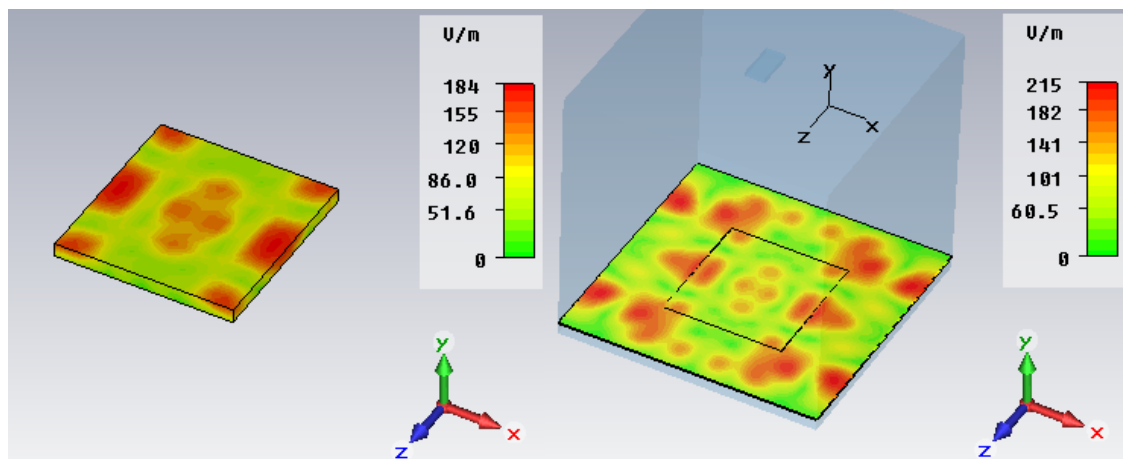
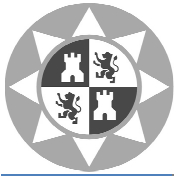


Figura 4. 11 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

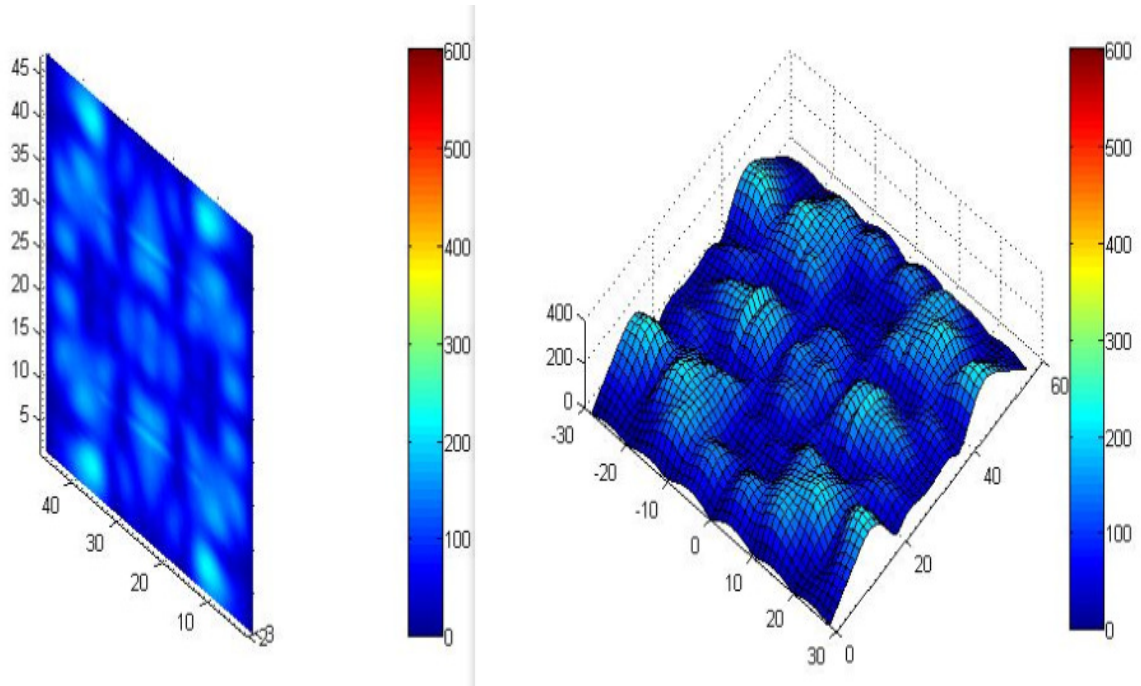
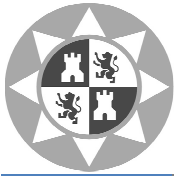


Figura 4. 12 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MAÍZ
Media (mean E)	96.0759
Varianza (var E)	1.4312e+03
Valor Máximo E	184.8

Tabla 4. 4 Parámetros calculados para diseño cúbico una guía y muestra de maíz



4.1.1.5 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de trigo.

Para la muestra de trigo observando el parámetro $S_{1,1}$ se obtiene un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45 GHz.

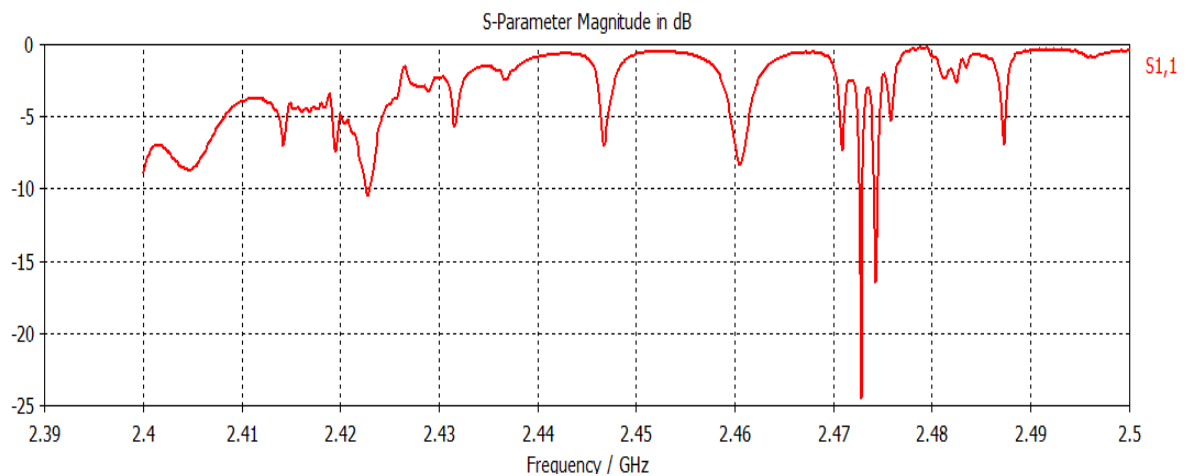


Figura 4. 13 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de trigo

A continuación se muestra la imagen del material analizado en una imagen 3D de la pieza completa y en una imagen 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

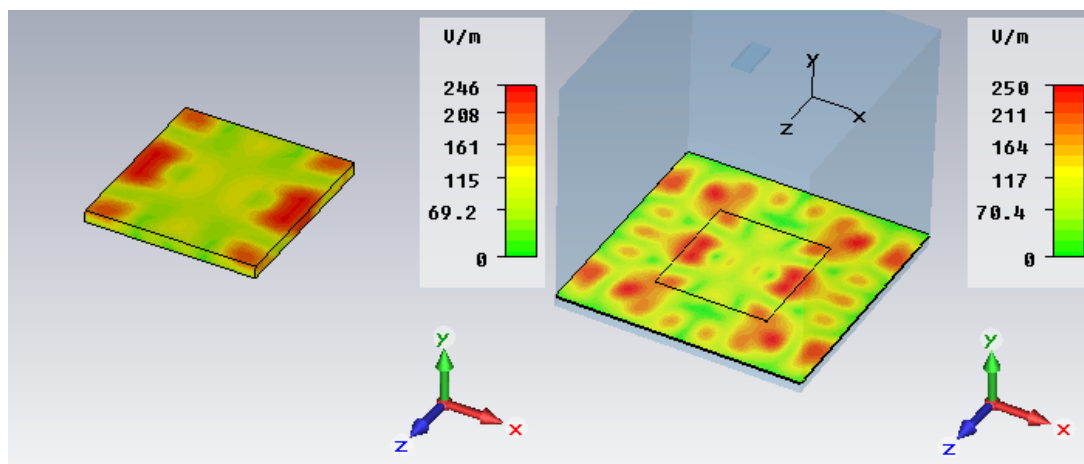
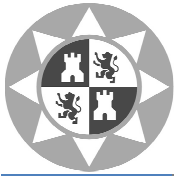


Figura 4. 14 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

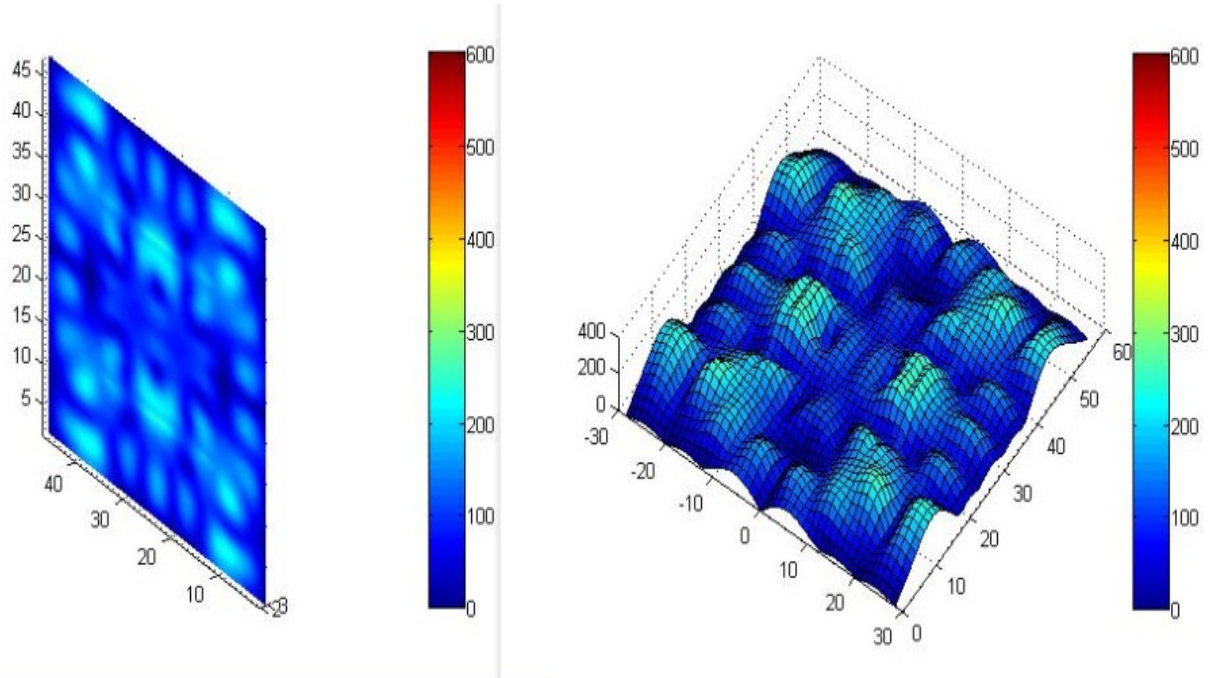
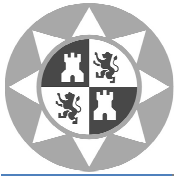


Figura 4. 15 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

<i>Muestra</i>	<i>TRIGO</i>
<i>Media (mean E)</i>	121.5296
<i>Varianza (var E)</i>	2.6762e+03
<i>Valor Máximo E</i>	247.2

Tabla 4. 5 Parámetros calculados para diseño cúbico una guía y muestra de trigo



4.1.1.6 Diseño cúbico con una guía de onda y muestra de pasta húmeda.

Para la muestra de pasta húmeda, el diseño se encuentra algo desplazado de la frecuencia de 2.45 GHz.

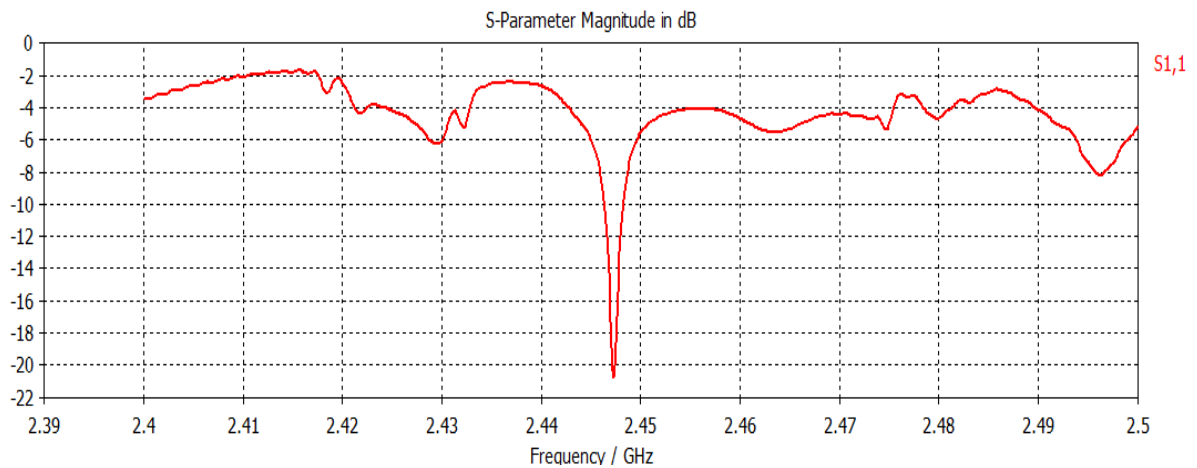


Figura 4. 16 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de pasta húmeda

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

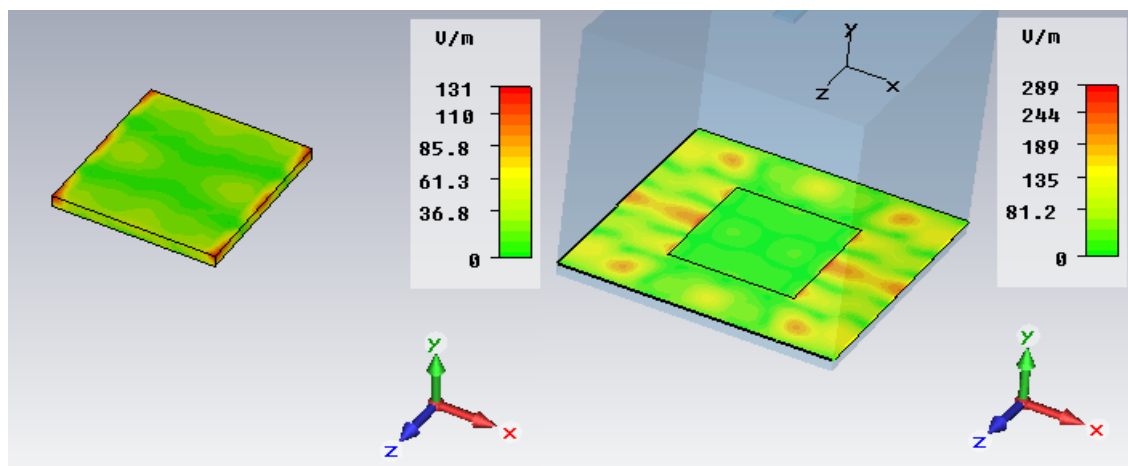
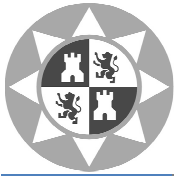


Figura 4. 17 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

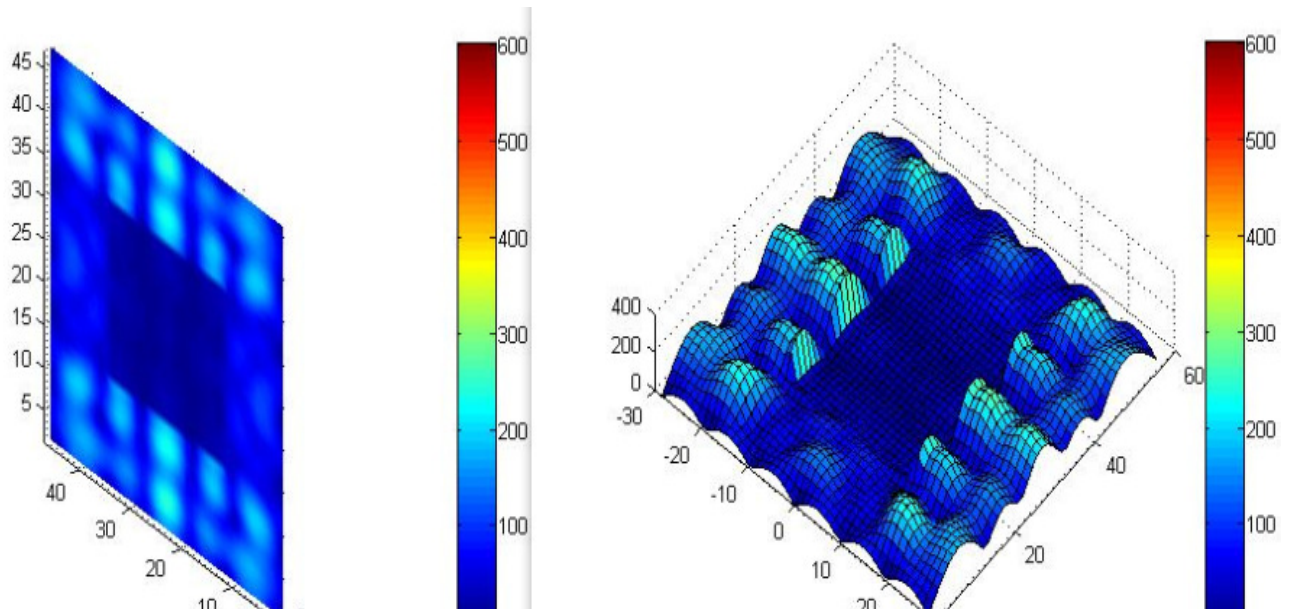
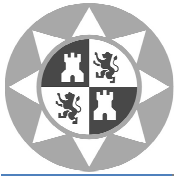


Figura 4. 18 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

<i>Muestra</i>	PASTA HÚMEDA
<i>Media (mean E)</i>	18.7031
<i>Varianza (var E)</i>	65.1542
<i>Valor Máximo E</i>	49.6

Tabla 4. 6 Parámetros calculados para diseño cúbico una guía y muestra de pasta húmeda



4.1.2 Resultados diseño cúbico con tres guías de ondas.

4.1.2.1 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de resina.

Al igual que en el diseño anterior, se ha representado el coeficiente de reflexión, la distribución del campo, y los parámetros de media, varianza y valor máximo del campo eléctrico sobre la muestra. Para la muestra de resina sólo el parámetro S1,1 se encuentra centrado a 2.45GHz.

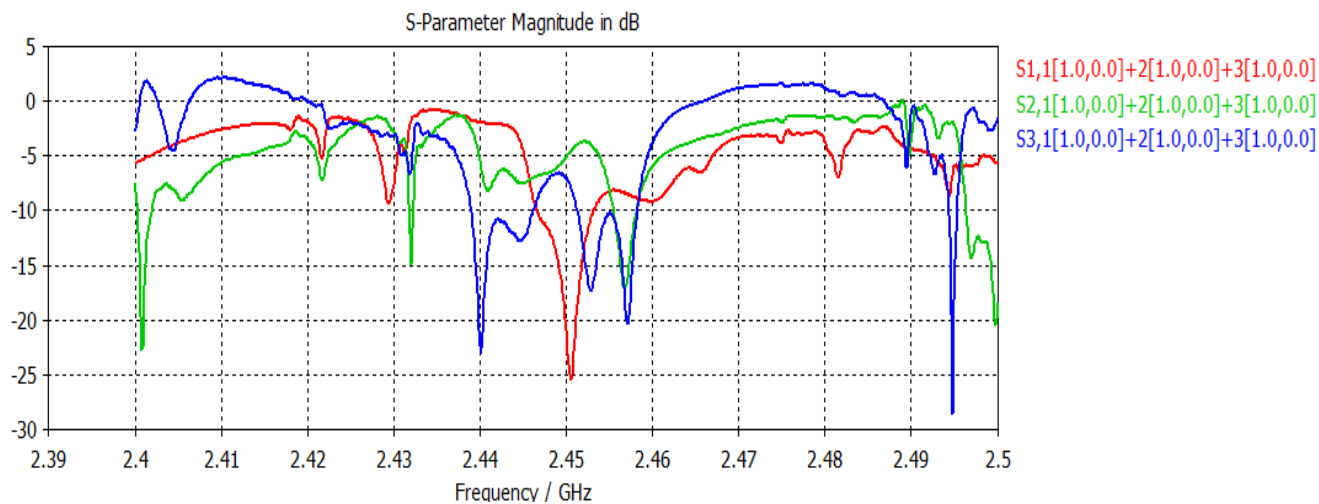


Figura 4. 19 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de resina

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

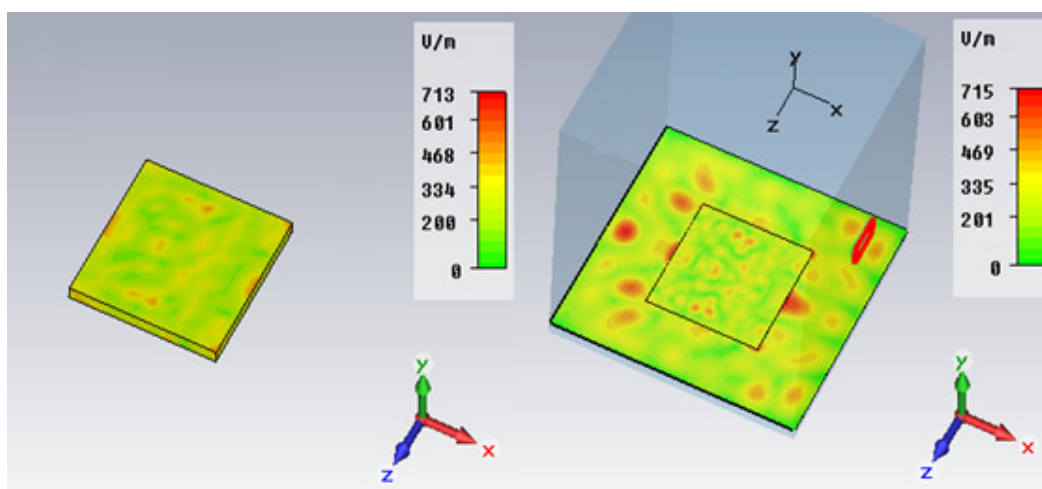
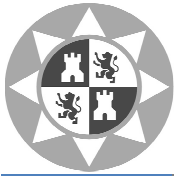


Figura 4. 20 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

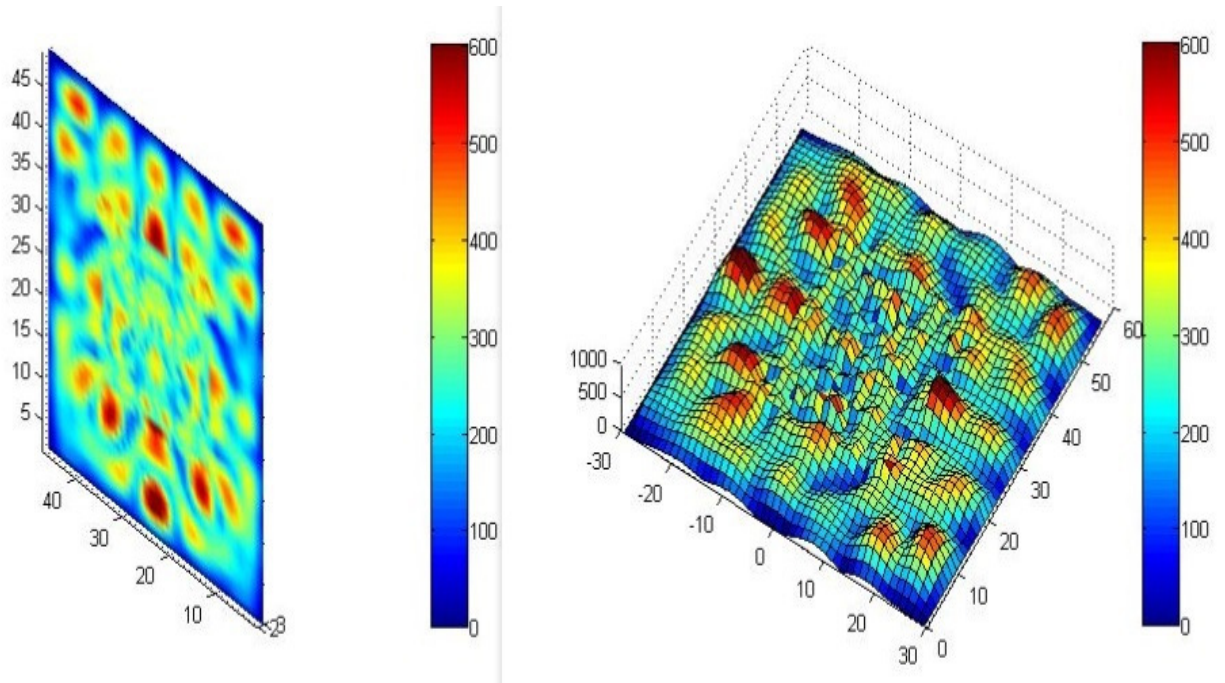
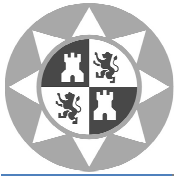


Figura 4. 21 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	RESINA
Media (mean E)	267.9214
Varianza (var E)	6.1904e+03
Valor Máximo E	510.5

Tabla 4. 7 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra de resina



4.1.2.2 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de madera de abedul.

Observando los parámetros S1,1 S2,1 y S3,1 se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

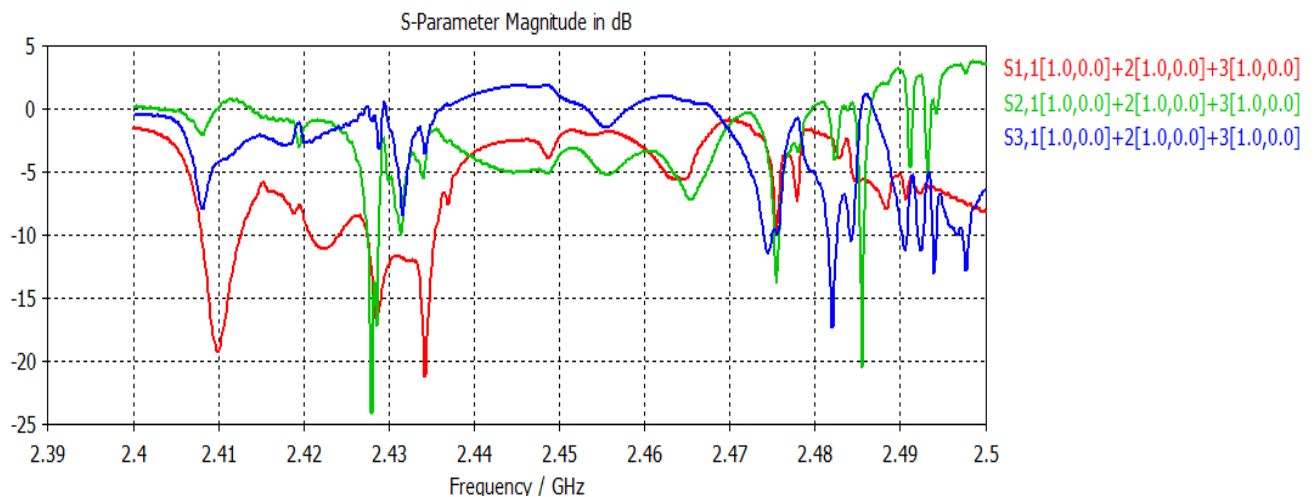


Figura 4. 22 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de madera de abedul

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

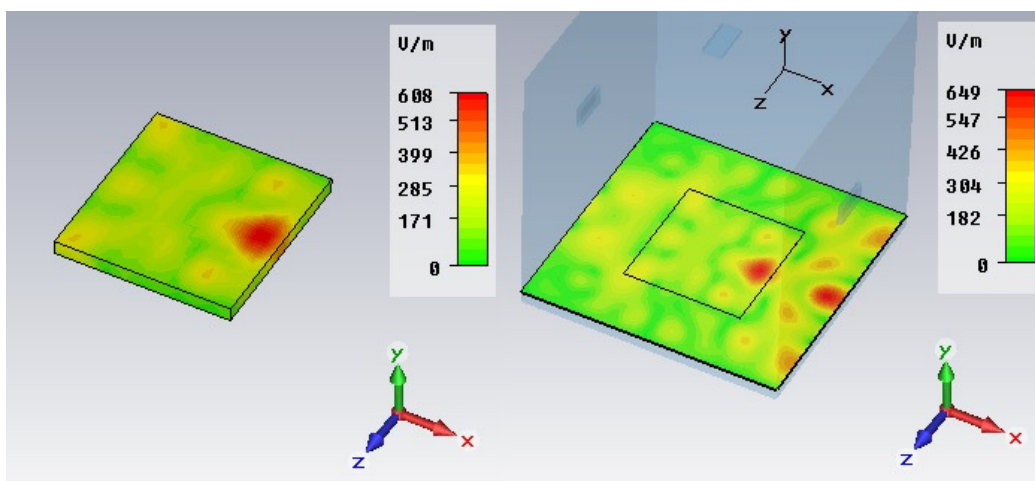
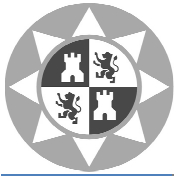


Figura 4. 23 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

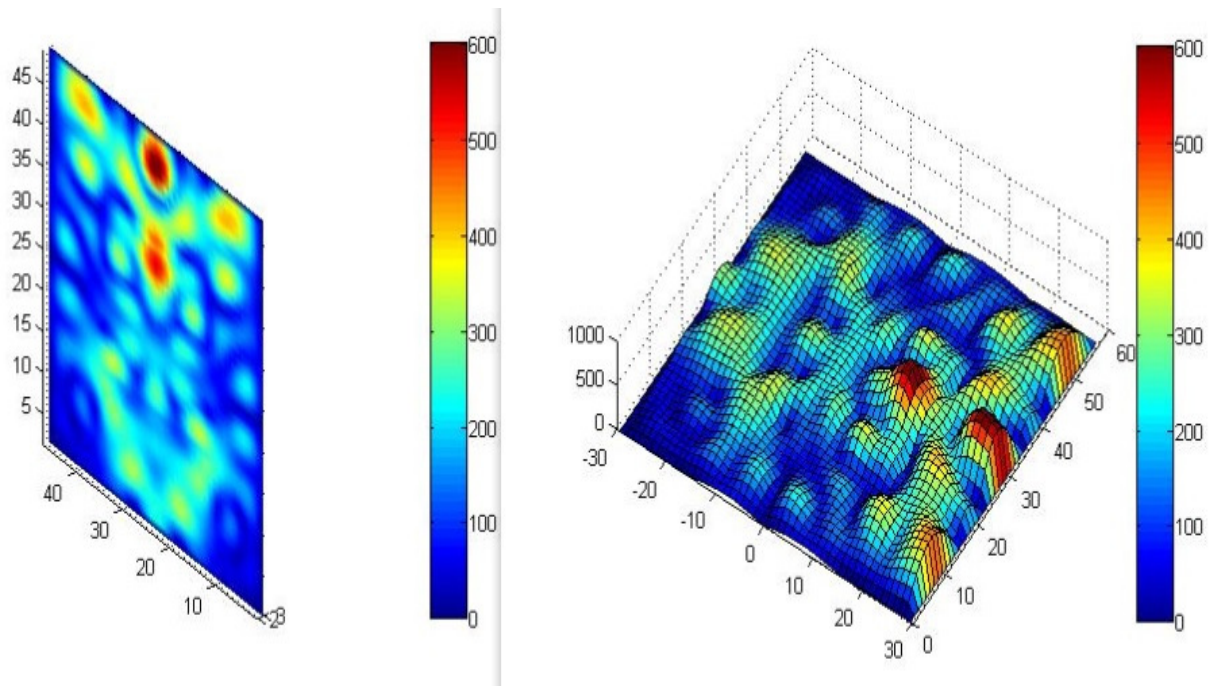
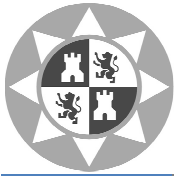


Figura 4. 24 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MADERA ABEDUL
Media (mean E)	217.5267
Varianza (var E)	9.5470e+03
Valor Máximo E	638.3

Tabla 4. 8 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra madera de abedul



4.1.2.3 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de mármol.

Para el diseño cúbico de tres guías de ondas y muestra de mármol se observa un sistema bien adaptado a 2.45GHz para los parámetros S1,1 y S3,1.

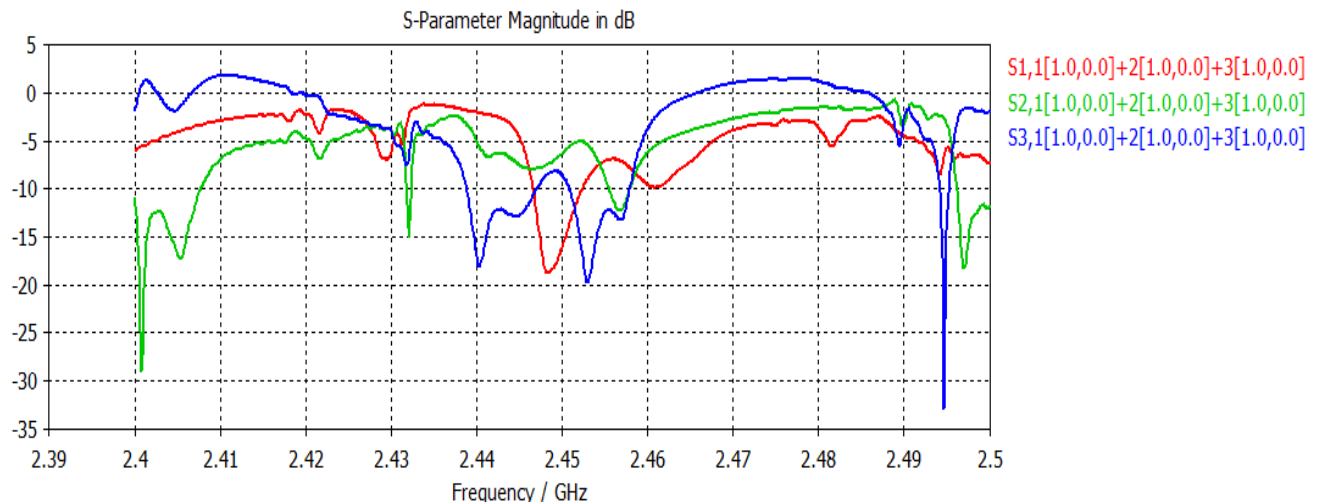


Figura 4. 25 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de mármol.

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

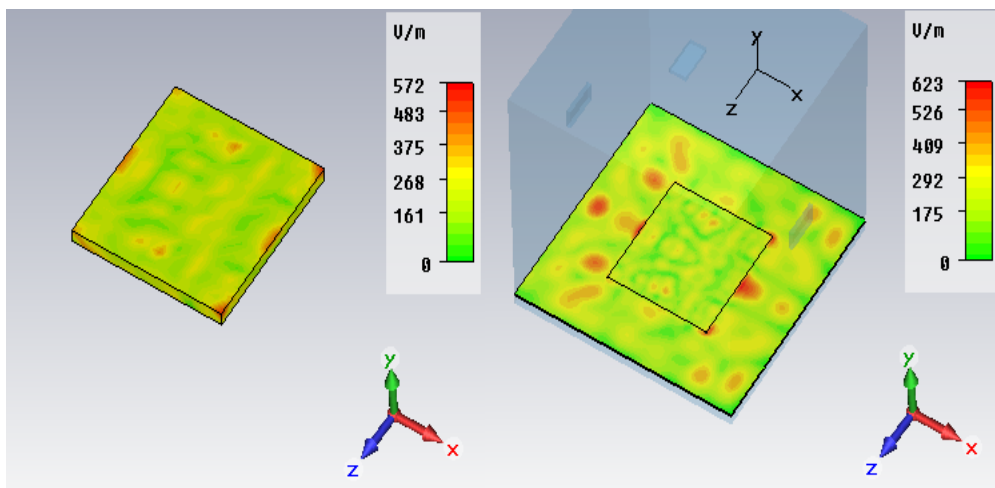
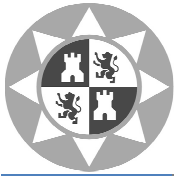


Figura 4. 26 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

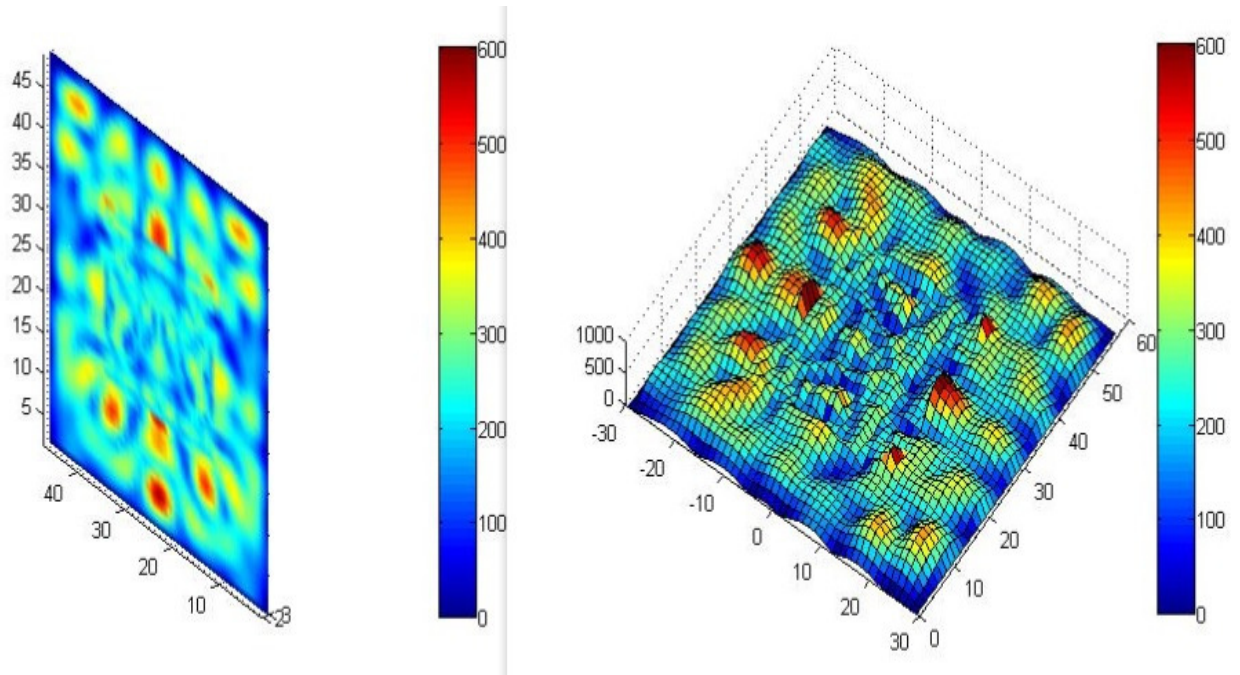
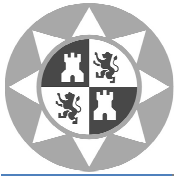


Figura 4. 27 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MÁRMOL
Media (mean E)	208.7902
Varianza (vare)	3.7680e+03
Valor Máximo E	412.6

Tabla 4. 9 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra de mármol



4.1.2.4 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de maíz.

Observando los parámetros $S_{1,1}$, $S_{2,1}$ y $S_{3,1}$ se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

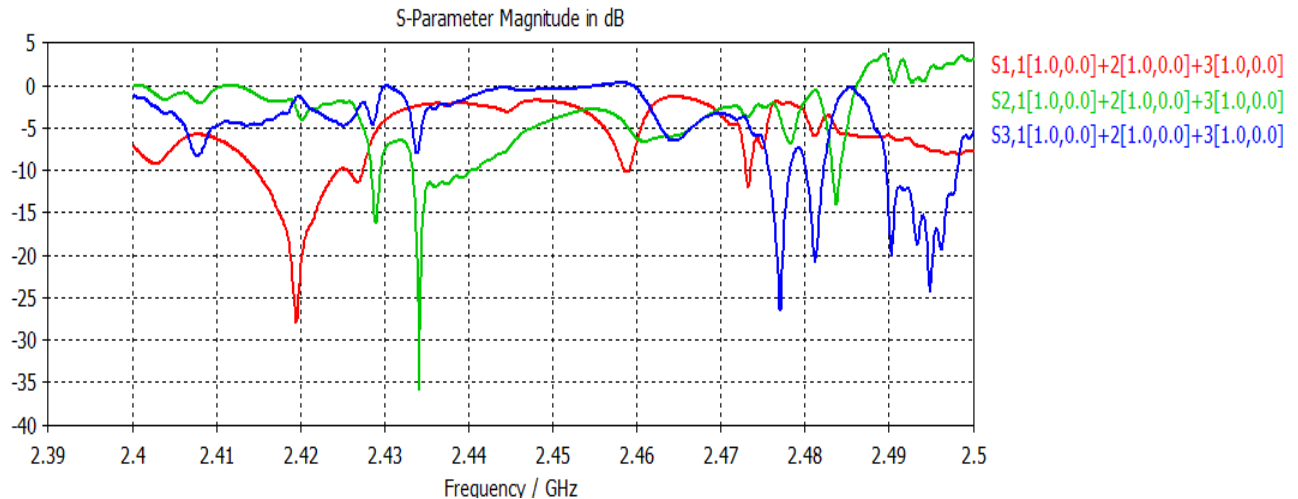


Figura 4. 28 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de maíz

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

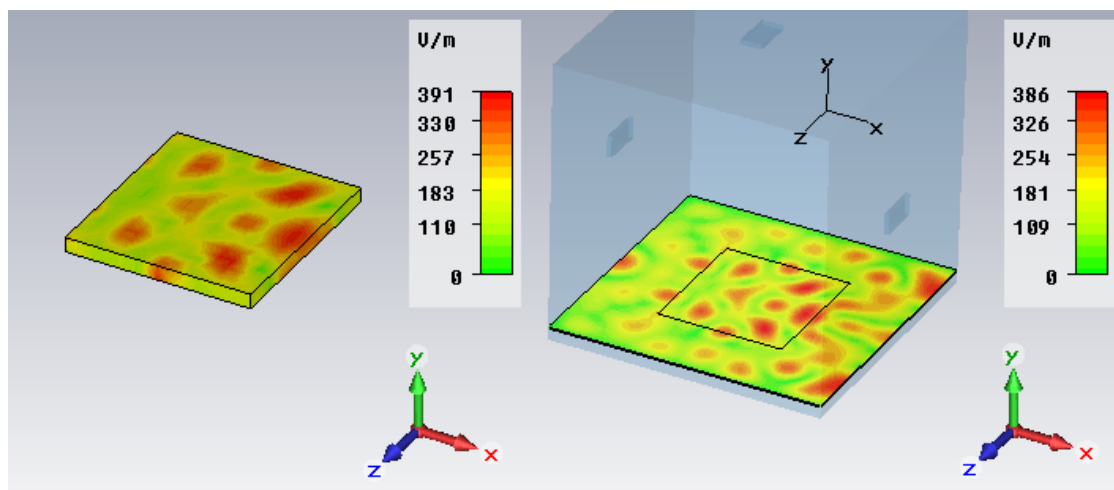
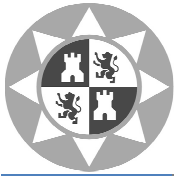


Figura 4. 29 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

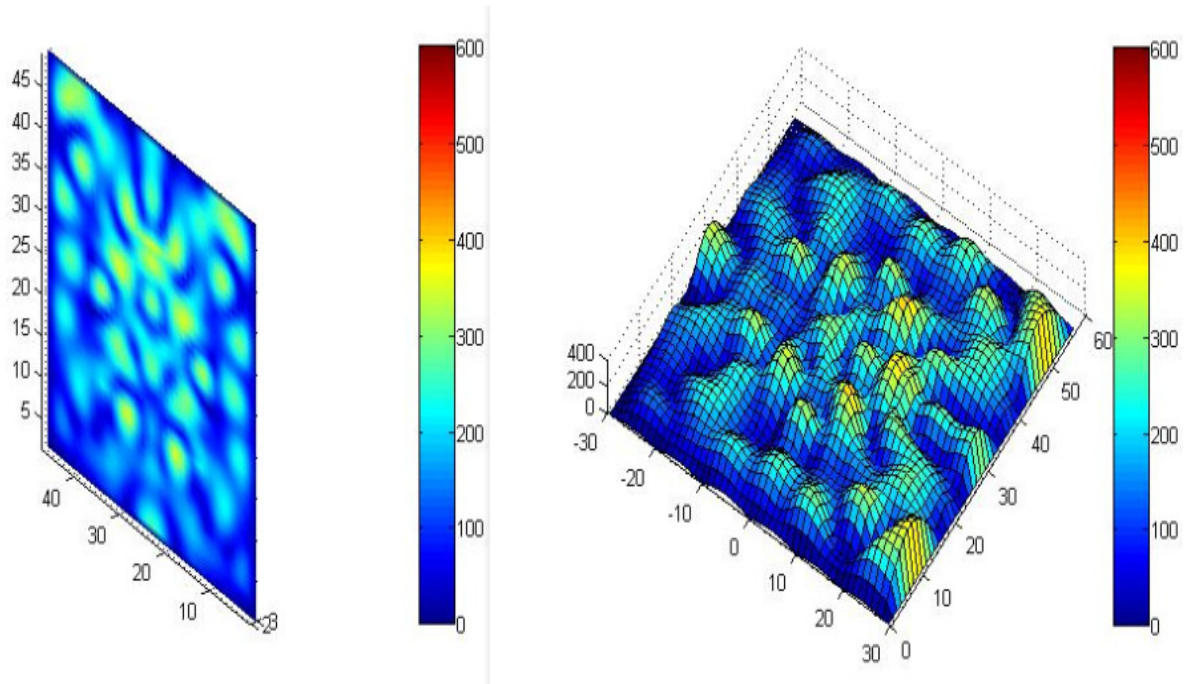
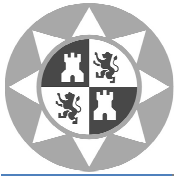


Figura 4. 30 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MAÍZ
Media (mean E)	197.7680
Varianza (vare)	5.3360e+03
Valor Máximo E	385.9

Tabla 4. 10 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra de maíz



4.1.2.5 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de trigo.

Observando los parámetros $S_{1,1}$, $S_{2,1}$ y $S_{3,1}$ se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

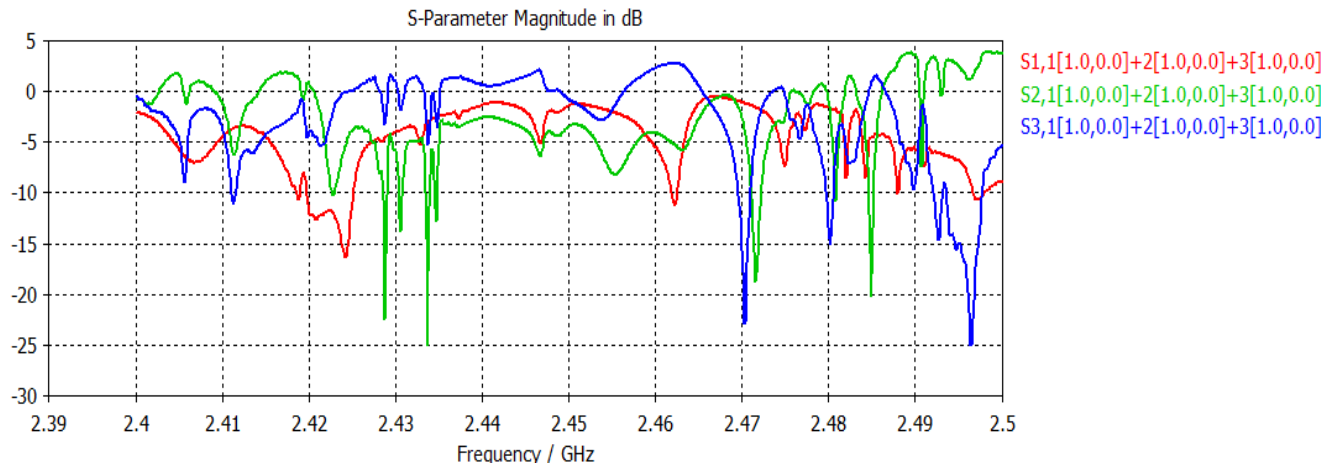


Figura 4. 31 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de trigo

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

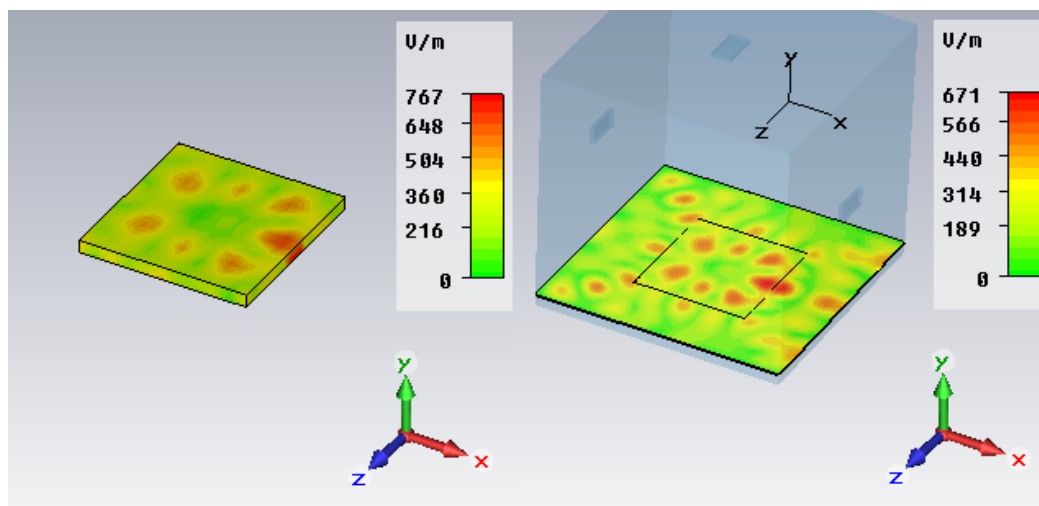
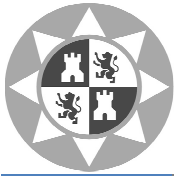


Figura 4. 32 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

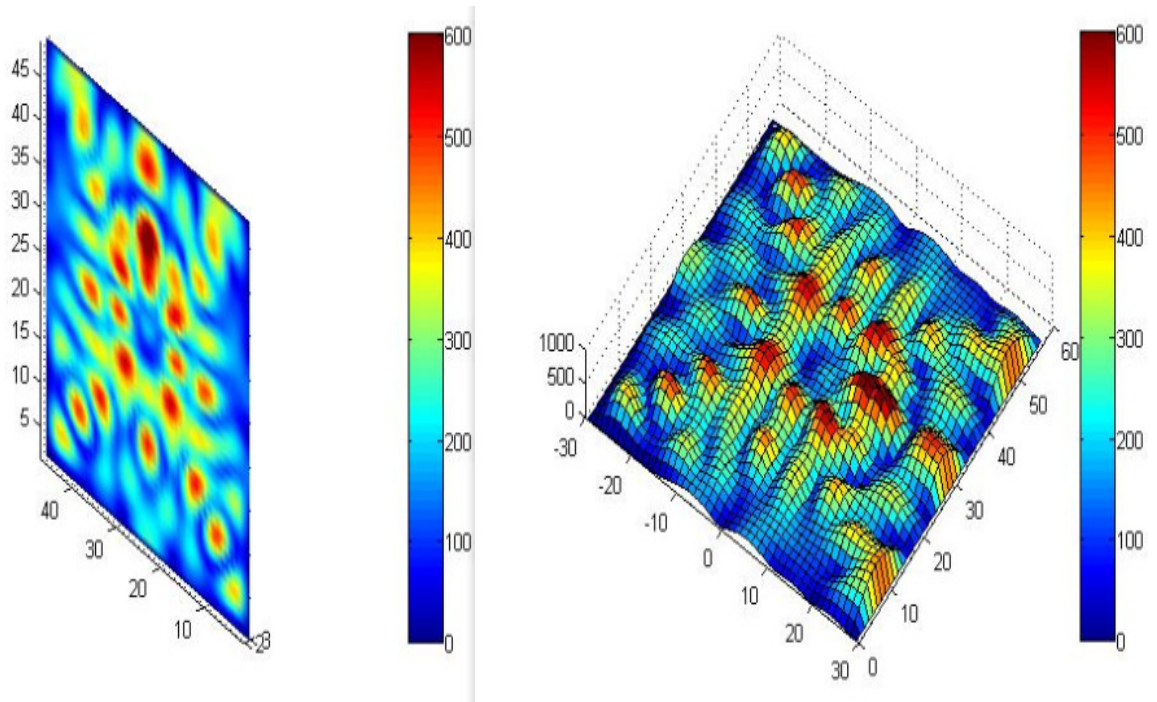
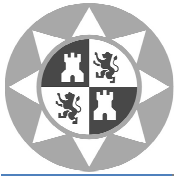


Figura 4. 33 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	TRIGO
Media (mean E)	314.6424
Varianza (vare)	1.3267e+04
Valor Máximo E	671.8

Tabla 4. 11 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra de trigo



4.1.2.6 Diseño cúbico con tres guías de ondas y muestra de pasta húmeda.

Para el diseño cúbico de tres guías de ondas y muestra de pasta húmeda se observa un sistema mal adaptado a 2.45GHz para los parámetros S2,1 y S3,1 y aceptable para S1,1.

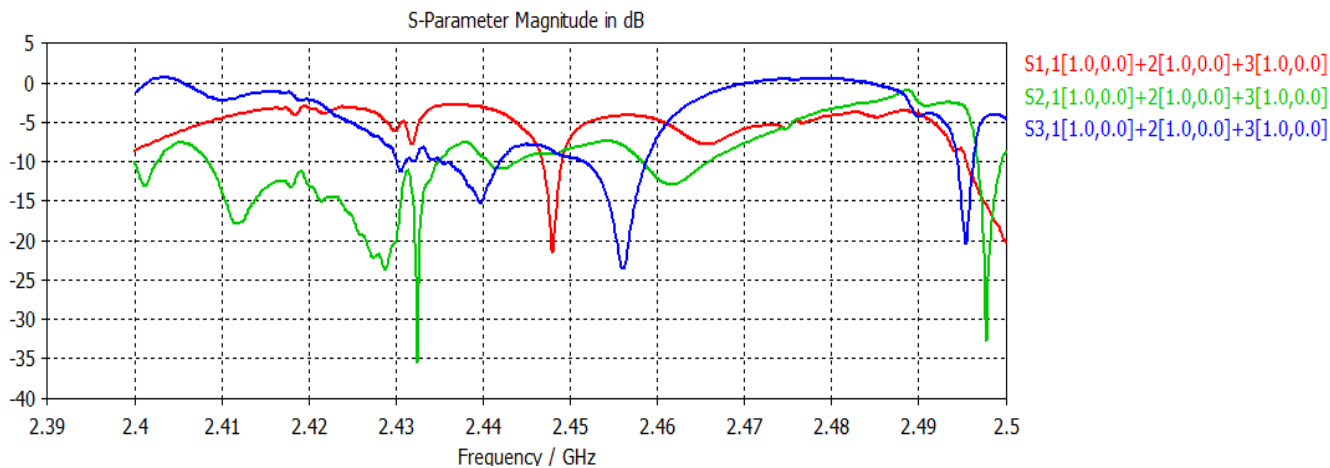


Figura 4. 34 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de pasta húmeda

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

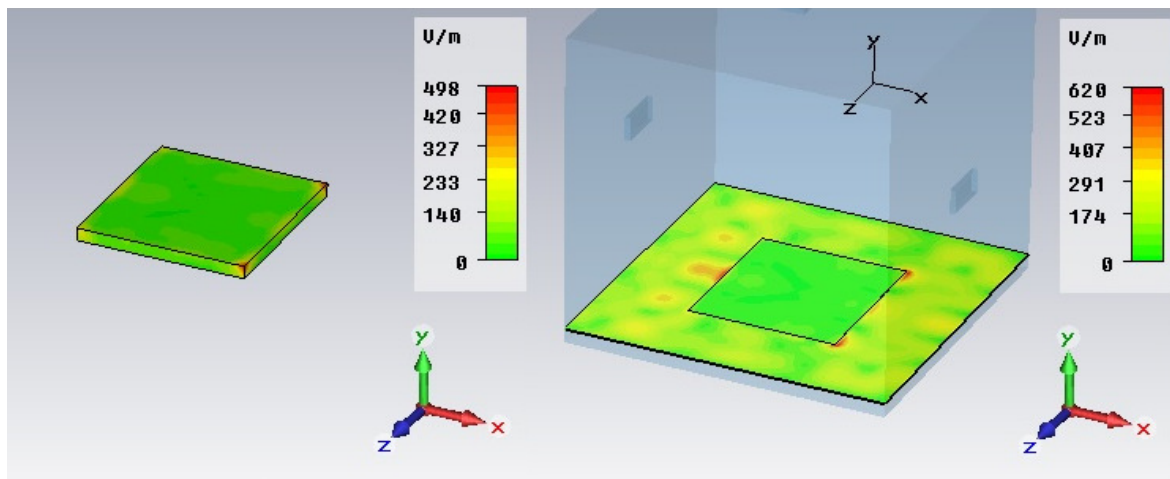
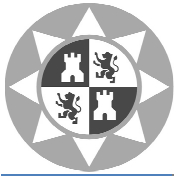


Figura 4. 35 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

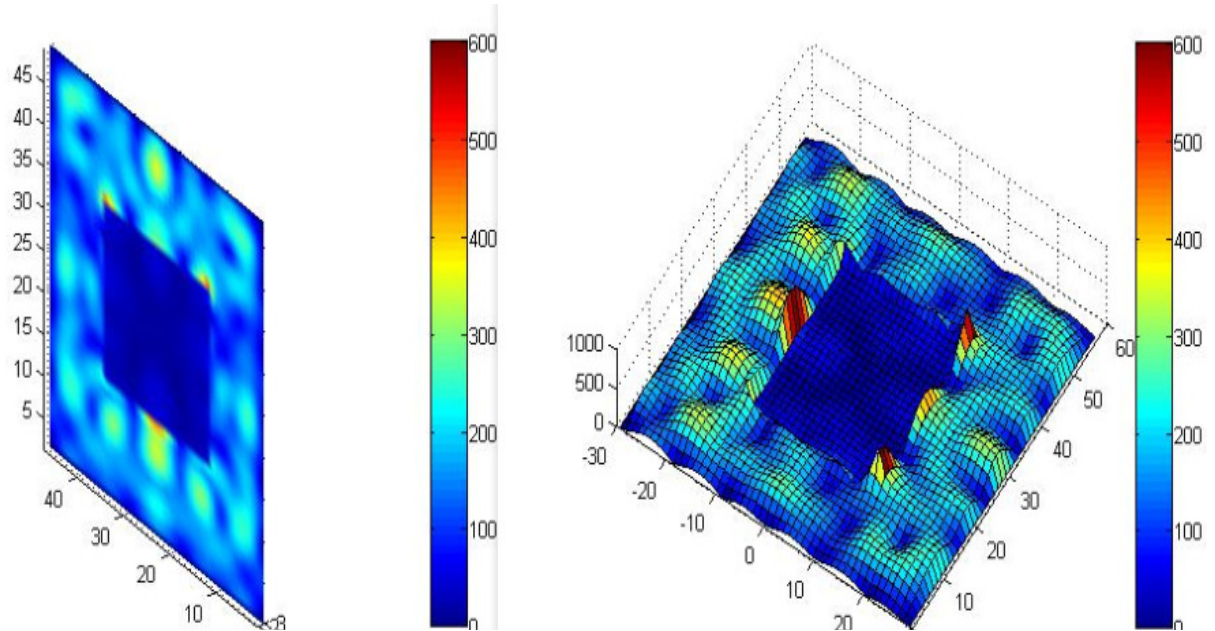
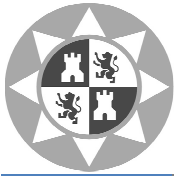


Figura 4. 36 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

<i>Muestra</i>	PASTA HÚMEDA
<i>Media (mean E)</i>	35.2272
<i>Varianza (vare)</i>	224.1897
<i>Valor Máximo E</i>	116.1

Tabla 4. 12 Parámetros calculados para diseño cúbico de tres guías y muestra de pasta húmeda



4.2 Simulación del diseño hexagonal.

4.2.1 Resultados diseño hexagonal con una guía de onda.

4.2.1.1 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de resina.

Para cada diseño se ha representado el coeficiente de reflexión, la distribución del campo y los parámetros de media, varianza y valor máximo del campo eléctrico sobre la muestra. Para la muestra de resina el sistema se encuentra bien adaptado a 2.45GHz.

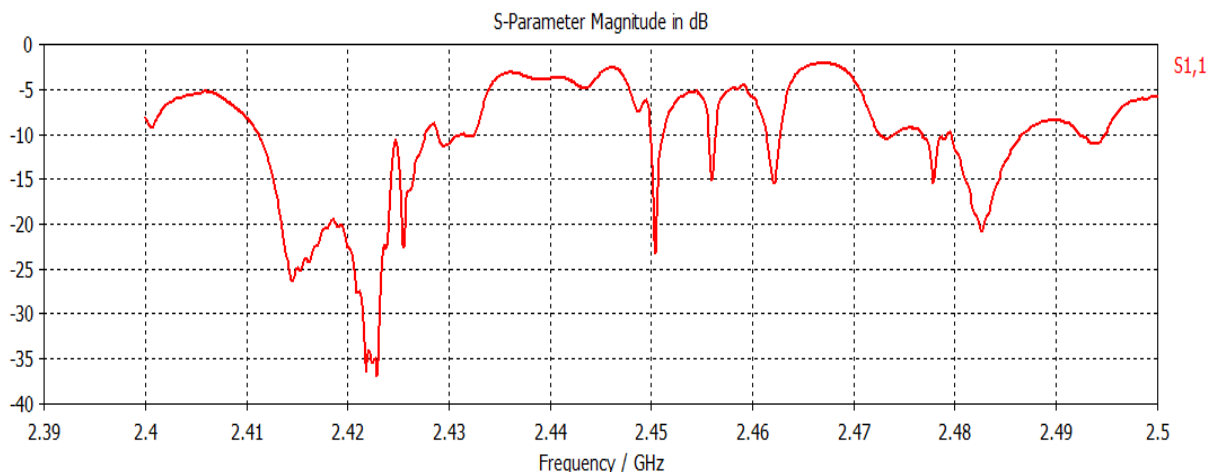


Figura 4. 37 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de resina

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

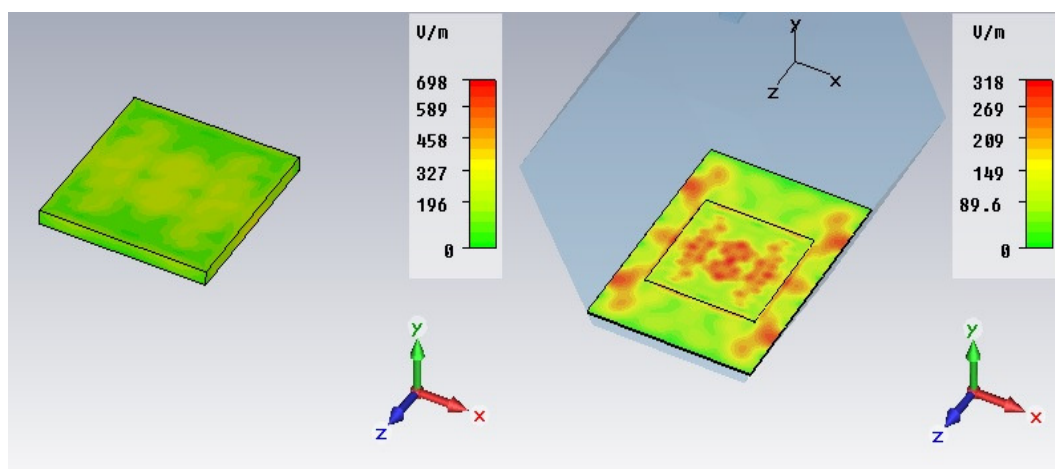
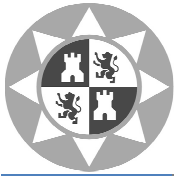


Figura 4. 38 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

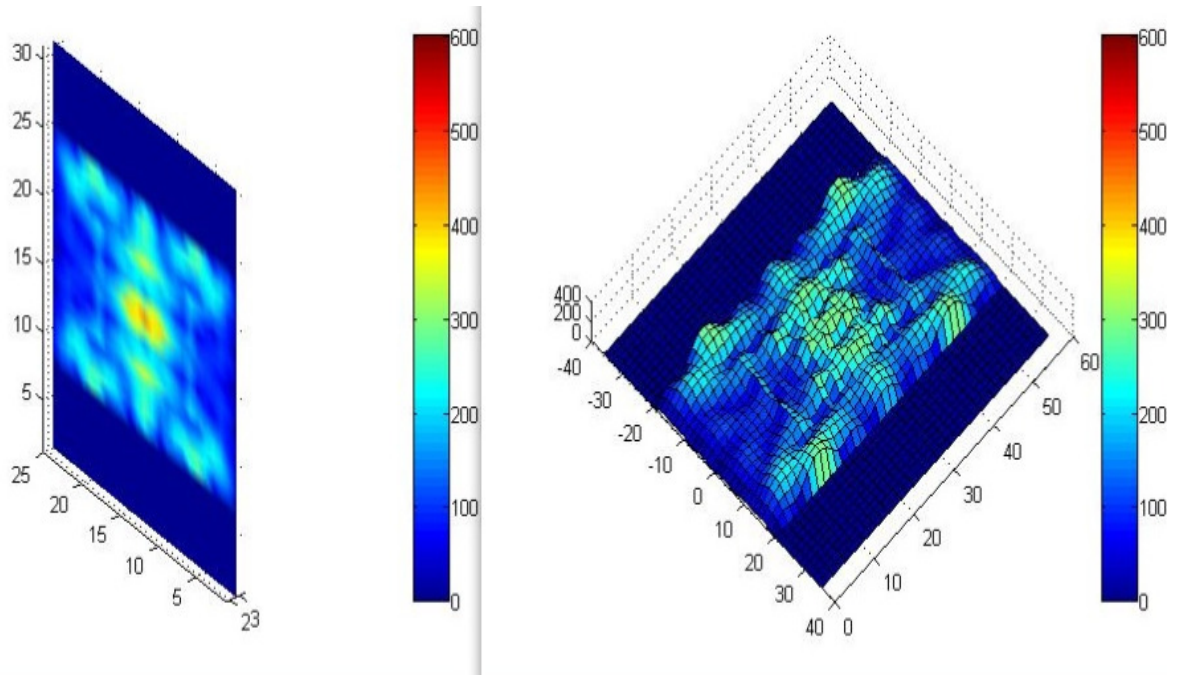
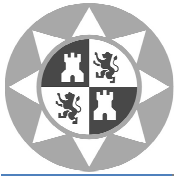


Figura 4. 39 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	RESINA
Media (mean E)	145.7959
Varianza (var E)	3.2356e+03
Valor Máximo E	294.1

Tabla 4. 13 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de resina



4.2.1.2 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de madera de abedul.

Para la muestra de madera de abedul, según el parámetro $S_{1,1}$ el sistema se encuentra algo desplazado de la frecuencia de 2.45GHz.

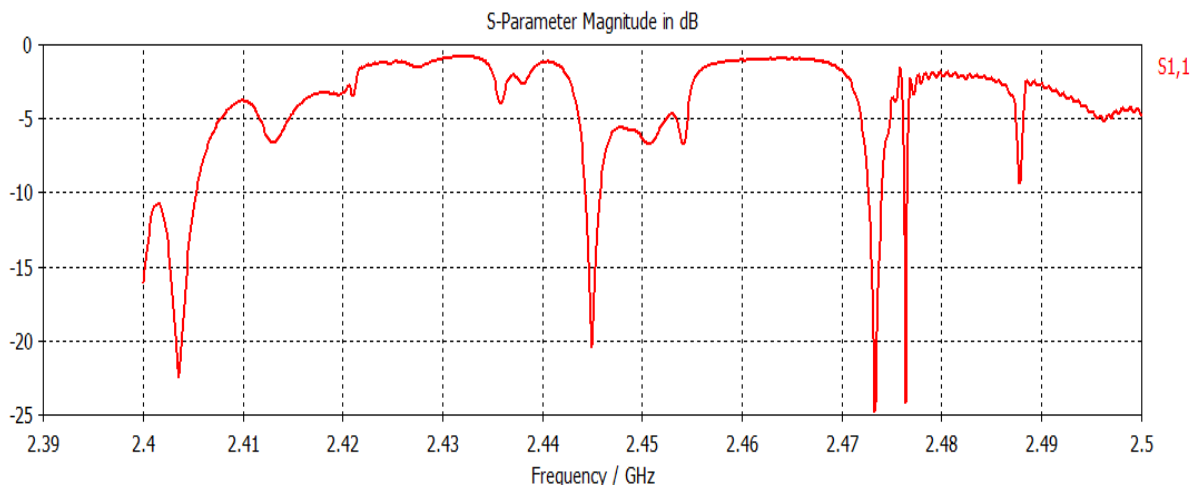


Figura 4. 40 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de madera de abedul.

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

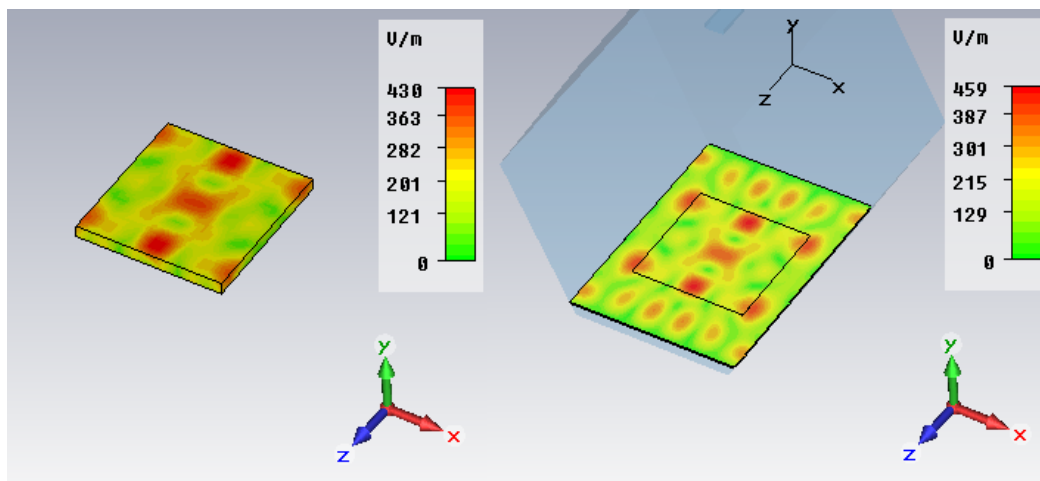
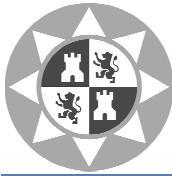


Figura 4. 41 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

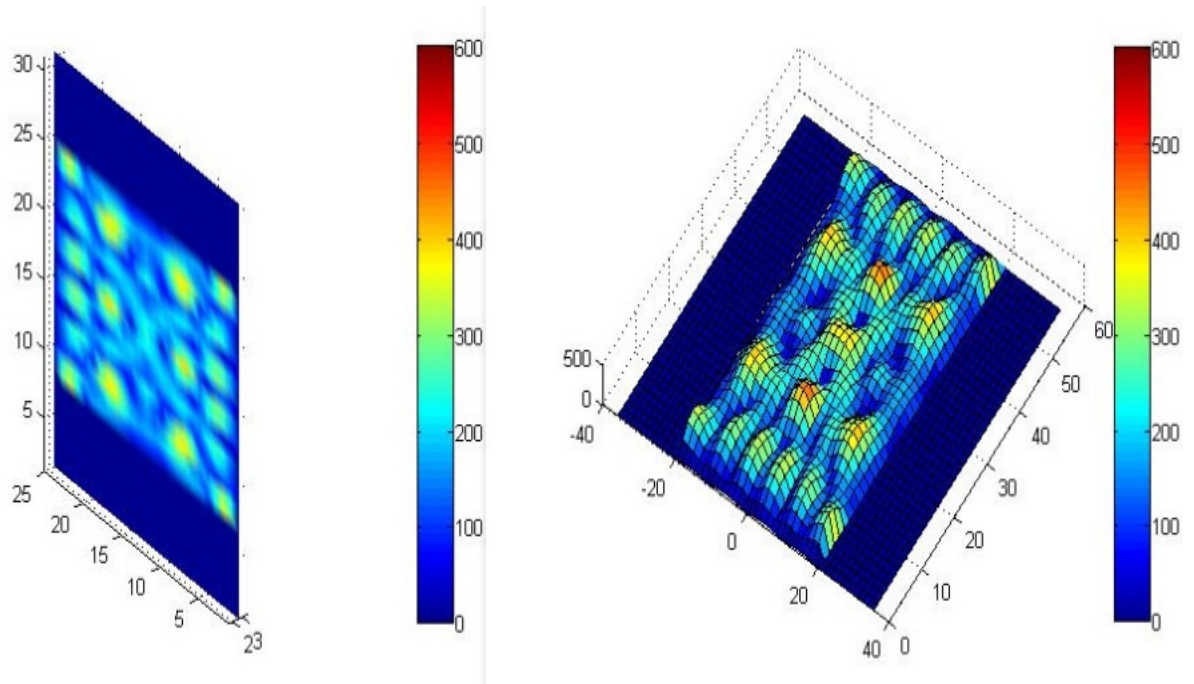
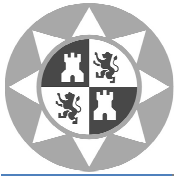


Figura 4. 42 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MADERA ABEDUL
Media (mean E)	211.7518
Varianza (var E)	7.4813e+03
Valor Máximo E	443.1

Tabla 4. 14 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de madera de abedul



4.2.1.3 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de mármol.

Para la muestra de mármol el coeficiente de reflexión muestra una muy buena adaptación del sistema a la frecuencia de 2.45GHz.

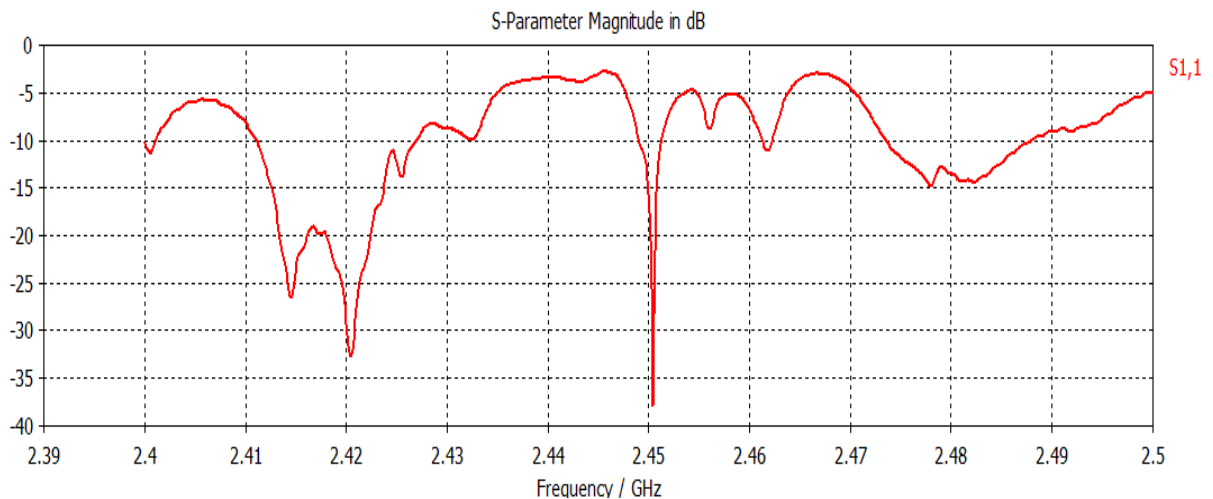


Figura 4. 43 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de mármol.

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

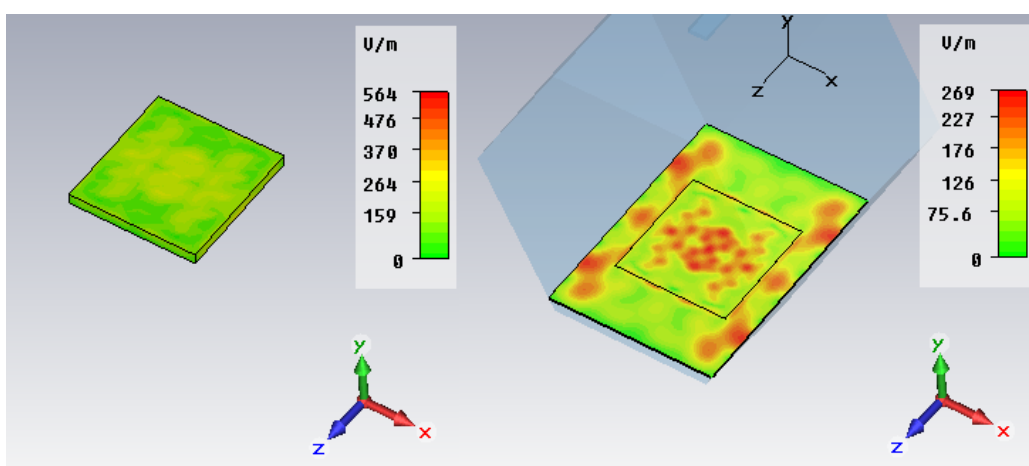
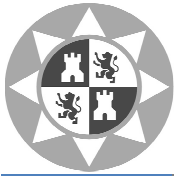


Figura 4. 44 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

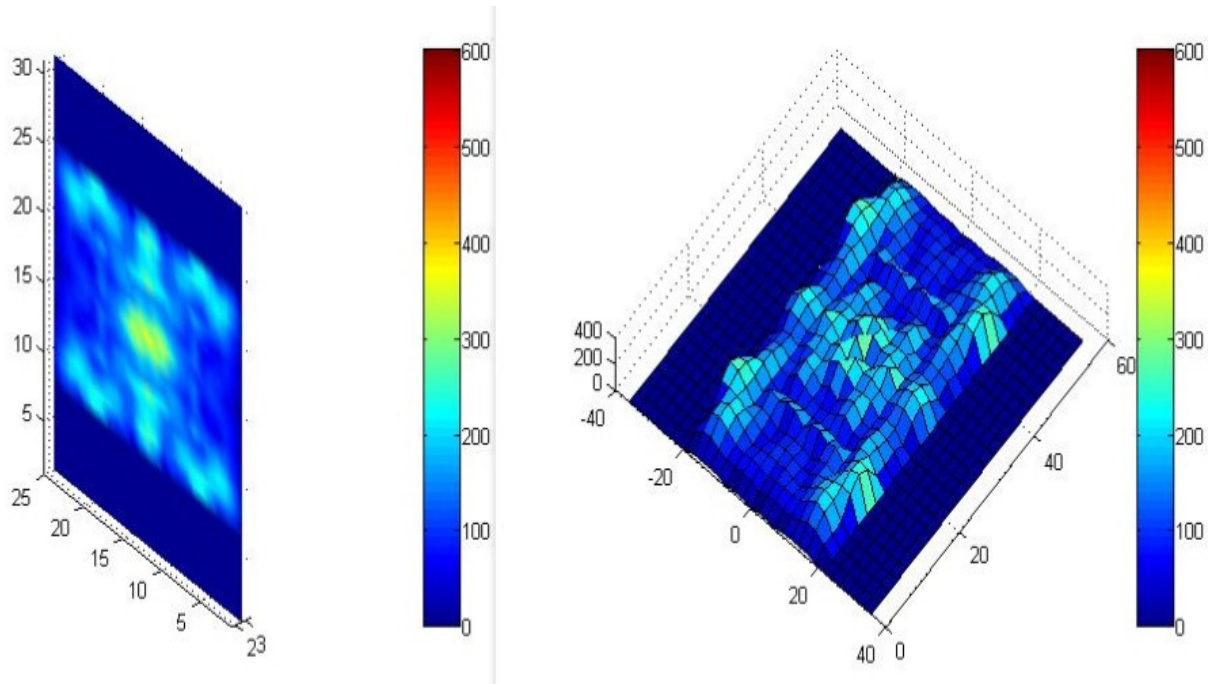
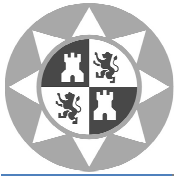


Figura 4. 45 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MÁRMOL
Media (mean E)	115.0287
Varianza (var E)	1.9195e+03
Valor Máximo E	249.1

Tabla 4. 15 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de mármol



4.2.1.4 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de maíz.

Para el diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de maíz se observa un parámetro $S_{1,1}$ aceptable para la frecuencia de 2.45GHz.

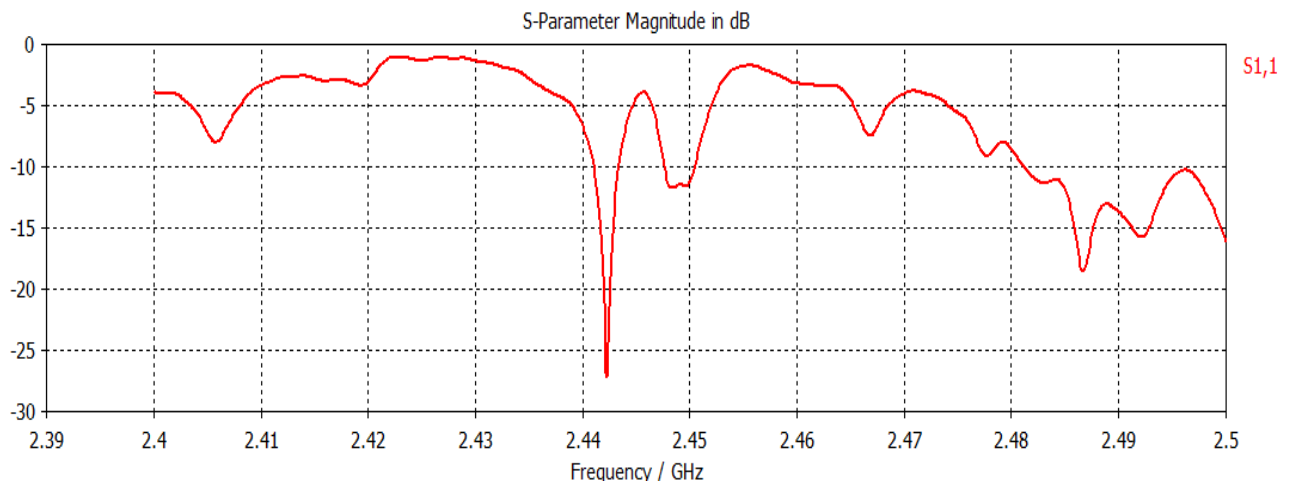


Figura 4. 46 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de maíz

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

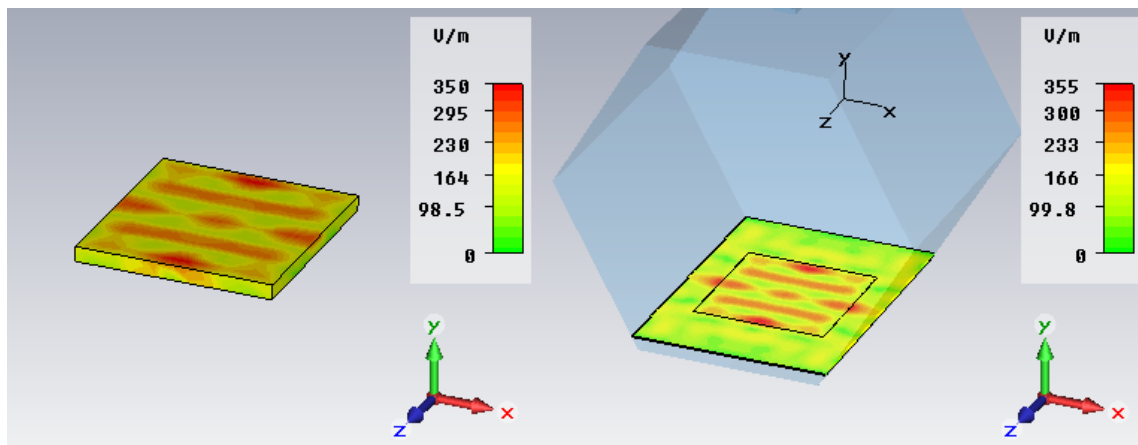
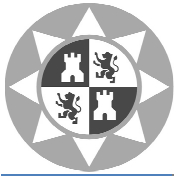


Figura 4. 47 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

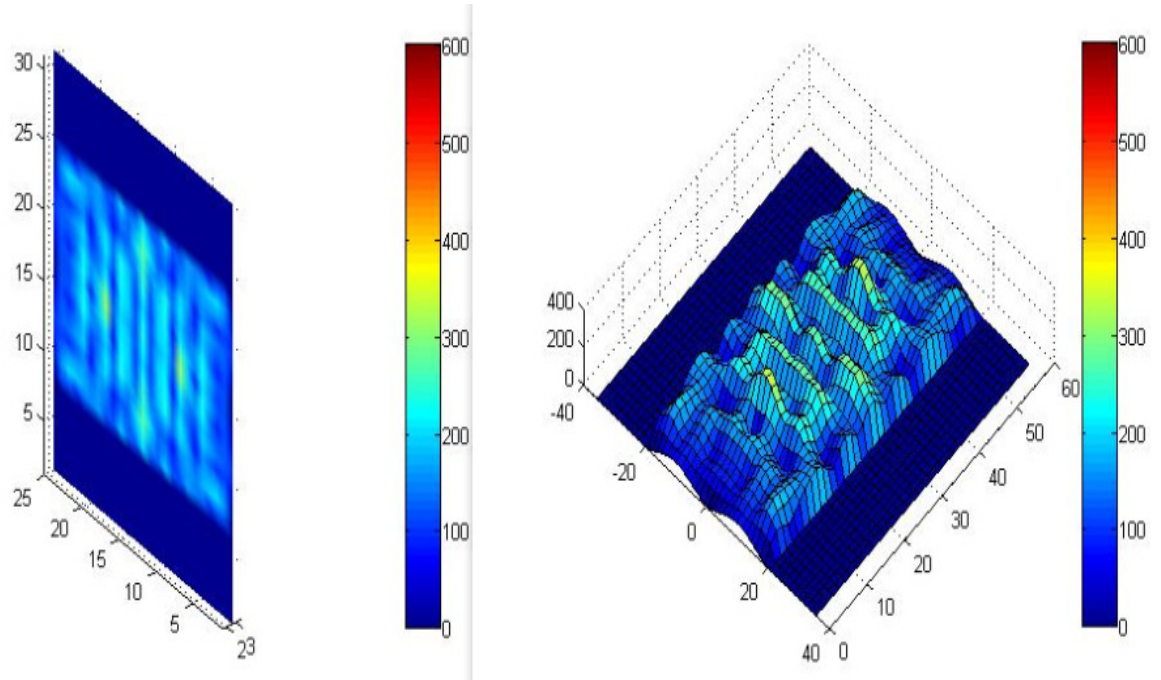
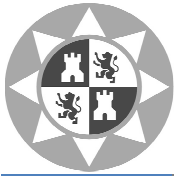


Figura 4. 48 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MAÍZ
Media (mean E)	204.2411
Varianza (var E)	2.9840e+03
Valor Máximo E	346.4

Tabla 4. 16 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de maíz



4.2.1.5 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de trigo.

Para la muestra de trigo se obtiene según el parámetro $S_{1,1}$ un sistema algo desplazado de la frecuencia de 2.45GHz.

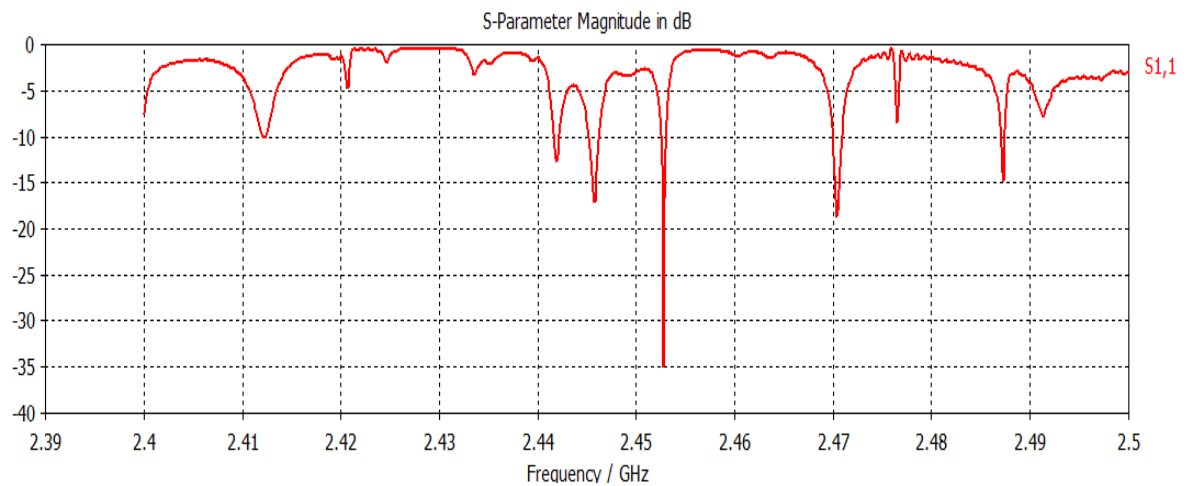


Figura 4. 49 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de trigo

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

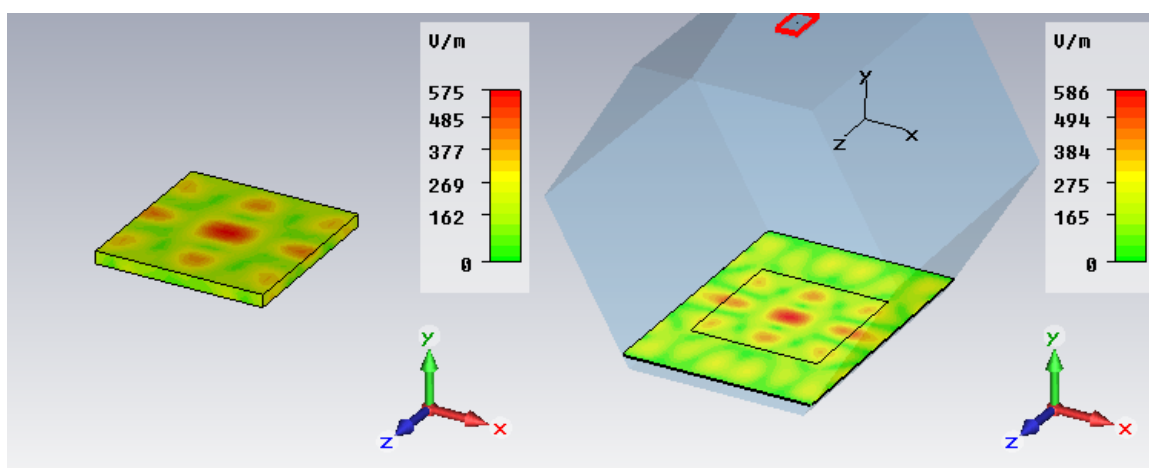
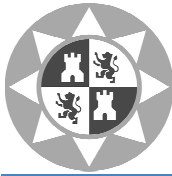


Figura 4. 50 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

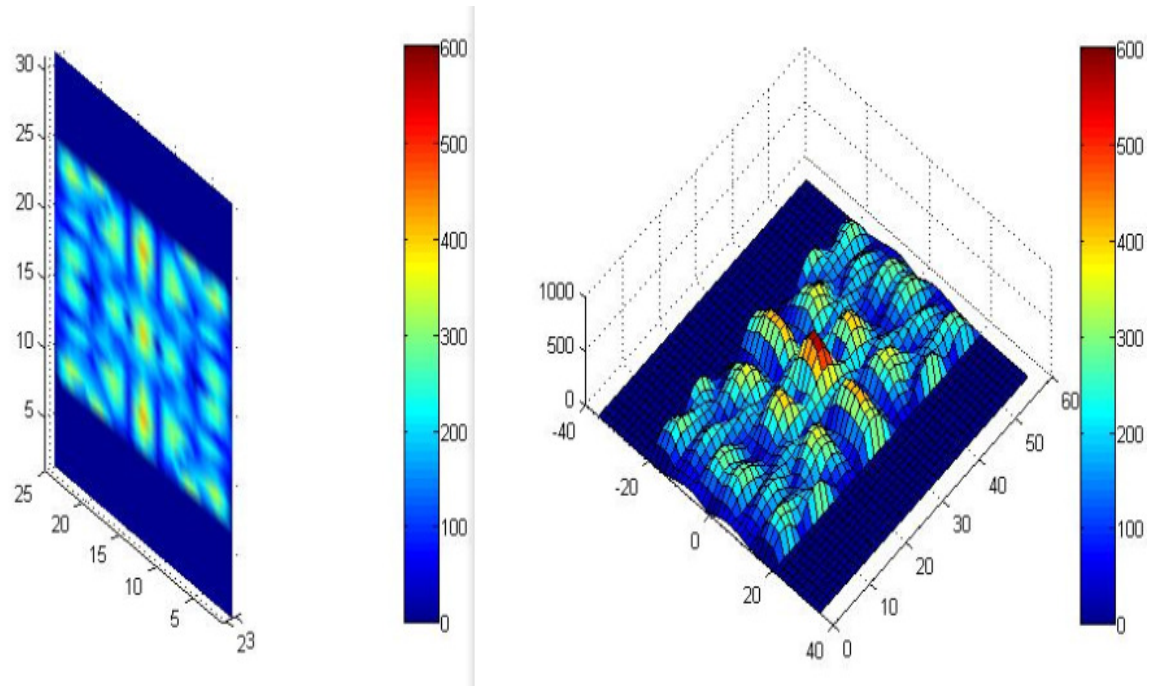
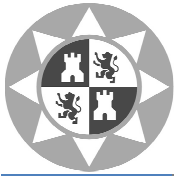


Figura 4. 51 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	TRIGO
Media (mean E)	235.5656
Varianza (var E)	1.0651e+04
Valor Máximo E	579.4

Tabla 4. 17 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de trigo



4.2.1.6 Diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de pasta húmeda.

Para el diseño hexagonal con una guía de onda y muestra de pasta húmeda se obtiene un sistema muy bien adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

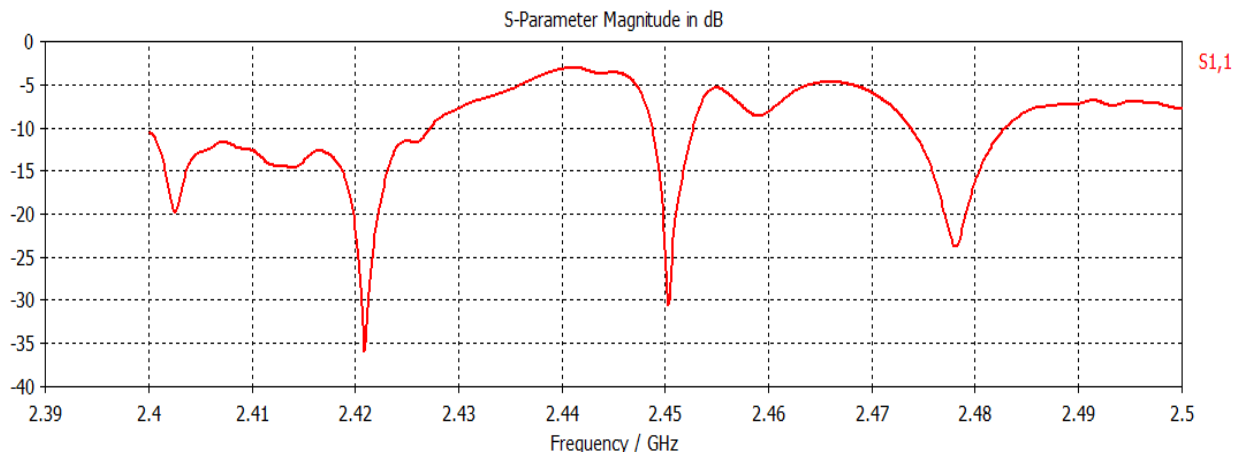


Figura 4. 52 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de pasta

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

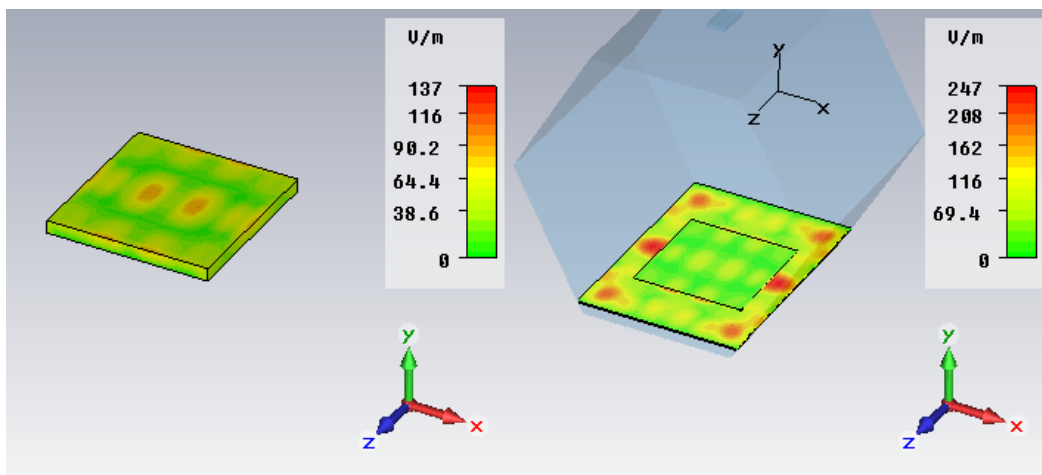
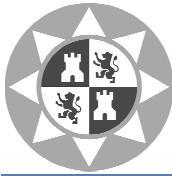


Figura 4. 53 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

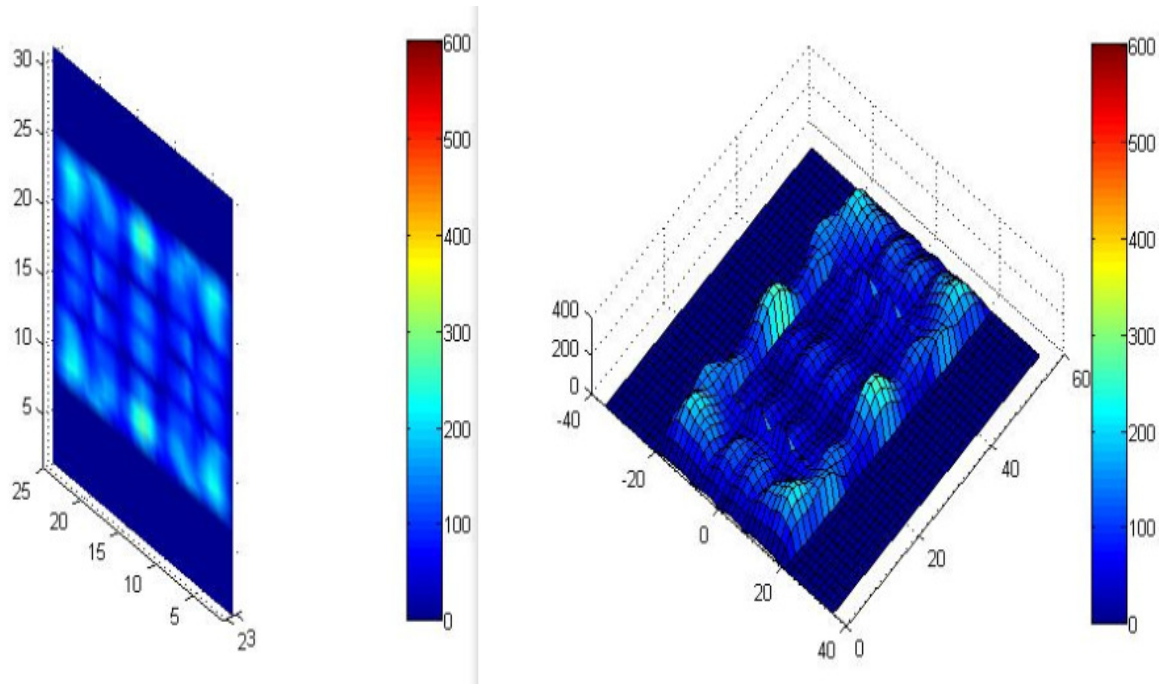
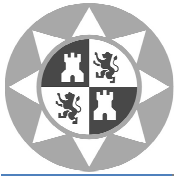


Figura 4. 54 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

<i>Muestra</i>	PASTA HÚMEDA
<i>Media (mean E)</i>	19.5427
<i>Varianza (var E)</i>	49.1453
<i>Valor Máximo E</i>	89.9

Tabla 4. 18 Parámetros calculados para diseño hexagonal de una guía y muestra de pasta húmeda



4.2.2 Resultados diseño hexagonal con tres guías de ondas.

4.2.2.1 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de resina.

Para cada diseño se ha representado el coeficiente de reflexión, la distribución del campo y los parámetros de media, varianza y valor máximo del campo eléctrico sobre la muestra. Para la muestra de resina se obtiene un parámetro $S_{3,1}$ centrado en 2.45GHz.

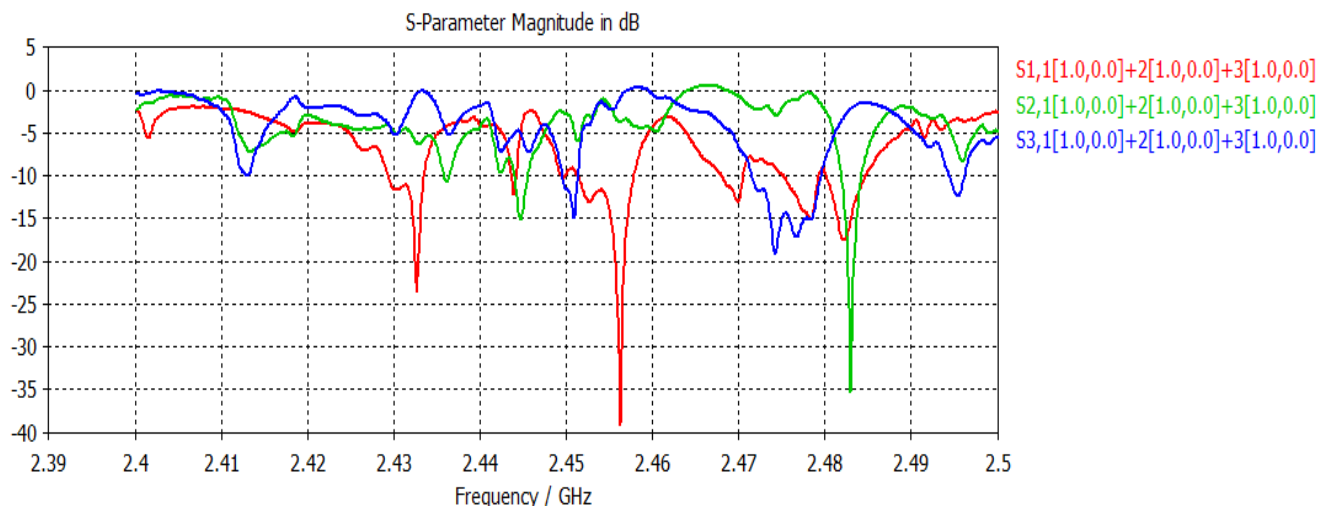


Figura 4. 55 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de resina

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

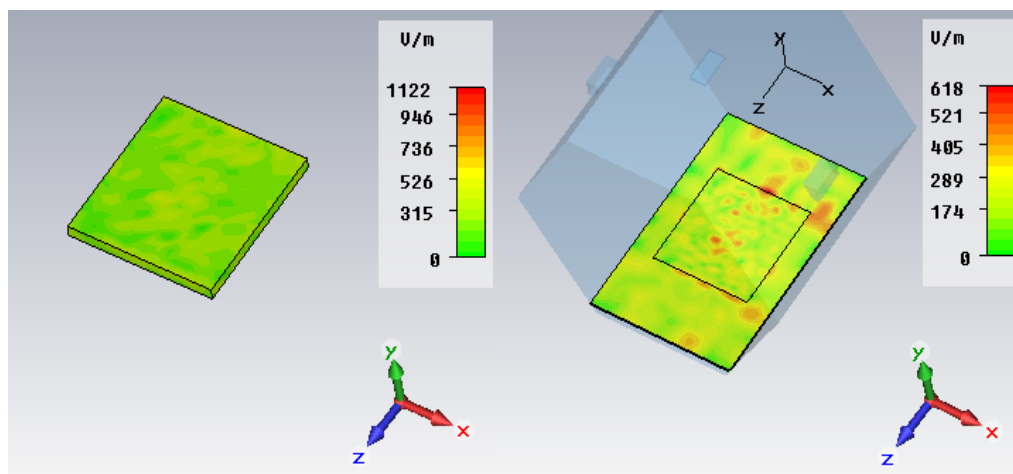
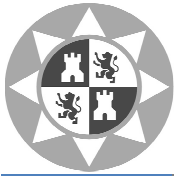


Figura 4. 56 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

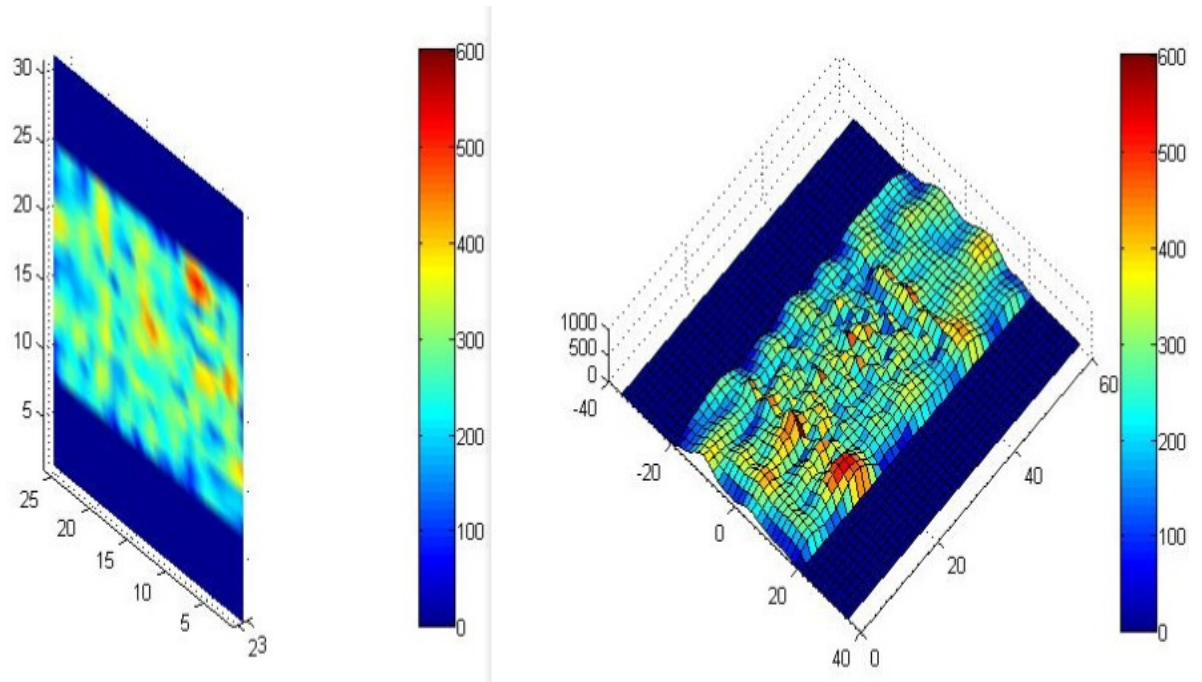
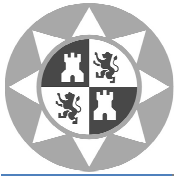


Figura 4. 57 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	RESINA
Media (mean E)	247.8955
Varianza (var E)	5.7844e+03
Valor Máximo E	513.6

Tabla 4. 19 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías con muestra de resina



4.2.2.2 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de madera de abedul.

Observando los parámetros $S_{1,1}$, $S_{2,1}$ y $S_{3,1}$ se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

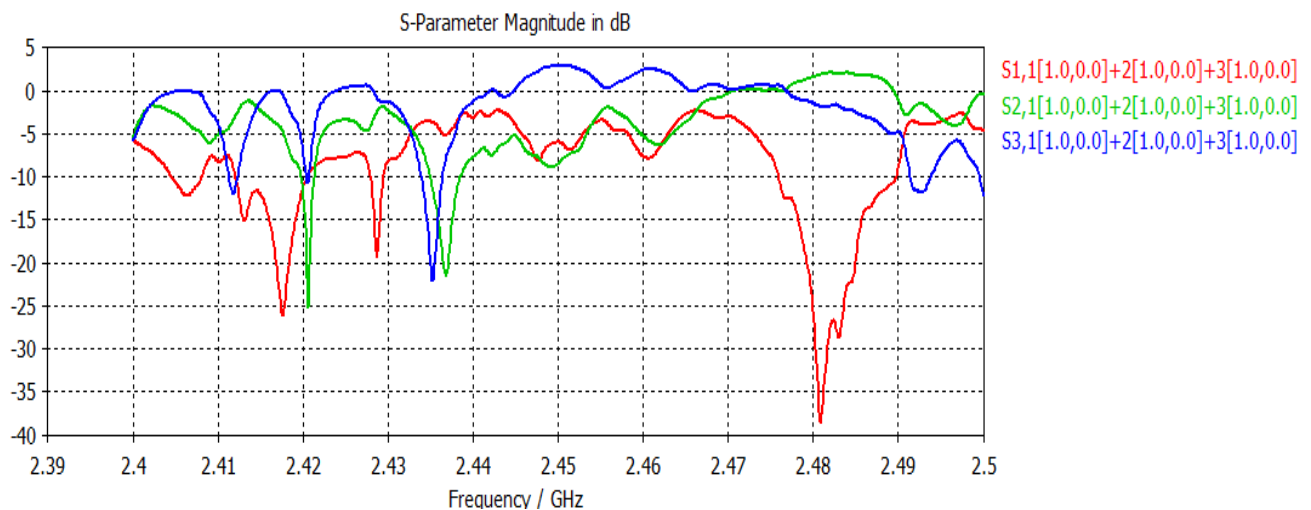


Figura 4. 58 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de madera de abedul

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

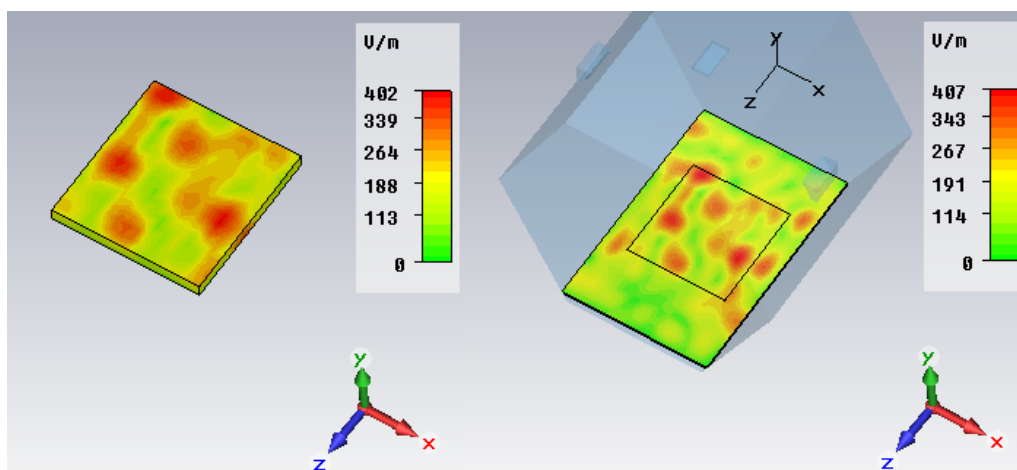
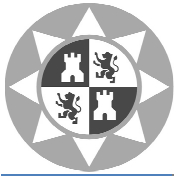


Figura 4. 59 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

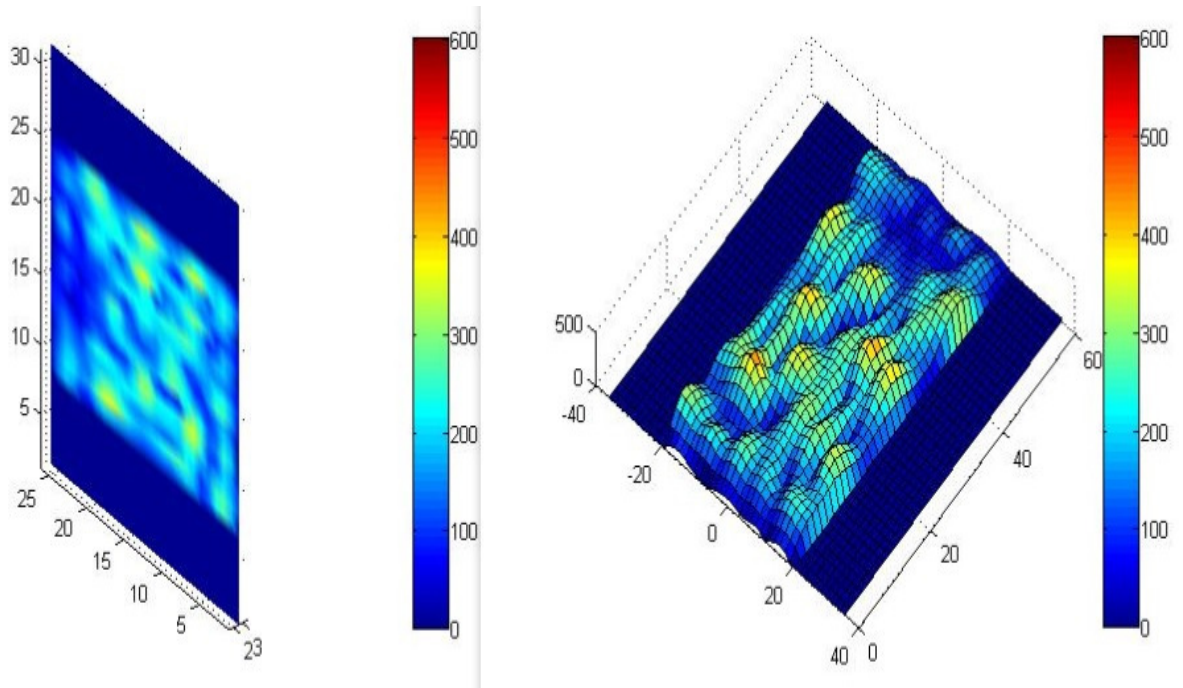
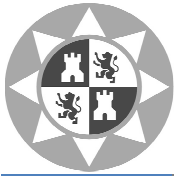


Figura 4. 60 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

<i>Muestra</i>	MADERA ABEDUL
<i>Media (mean E)</i>	223.8862
<i>Varianza (var E)</i>	5.060e+03
<i>Valor Máximo E</i>	398.7

Tabla 4. 20 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías y muestra madera de abedul



4.2.2.3 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de mármol.

Observando los parámetros $S_{1,1}$, $S_{2,1}$ y $S_{3,1}$ se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

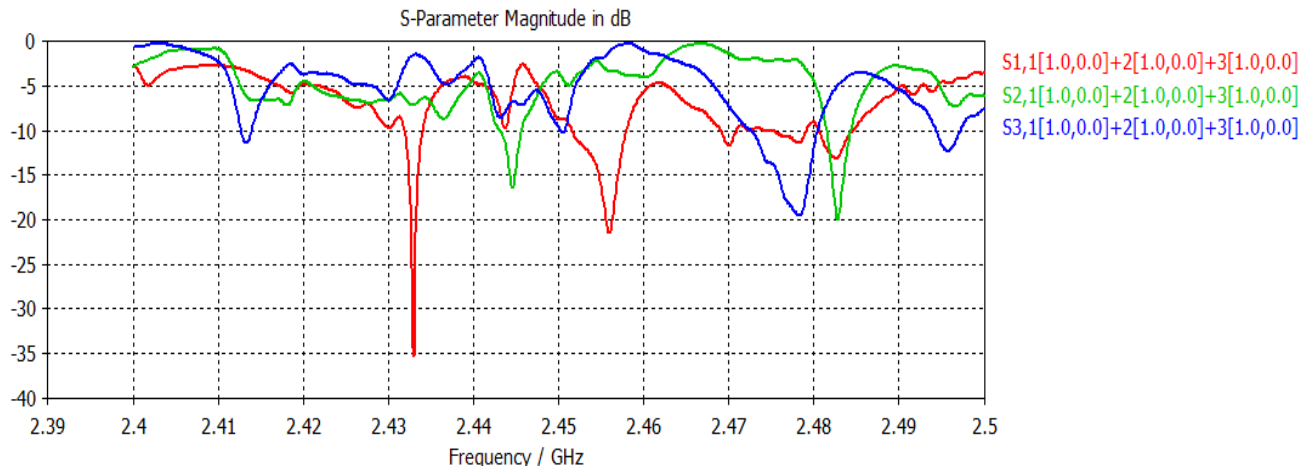


Figura 4. 61 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de mármol

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

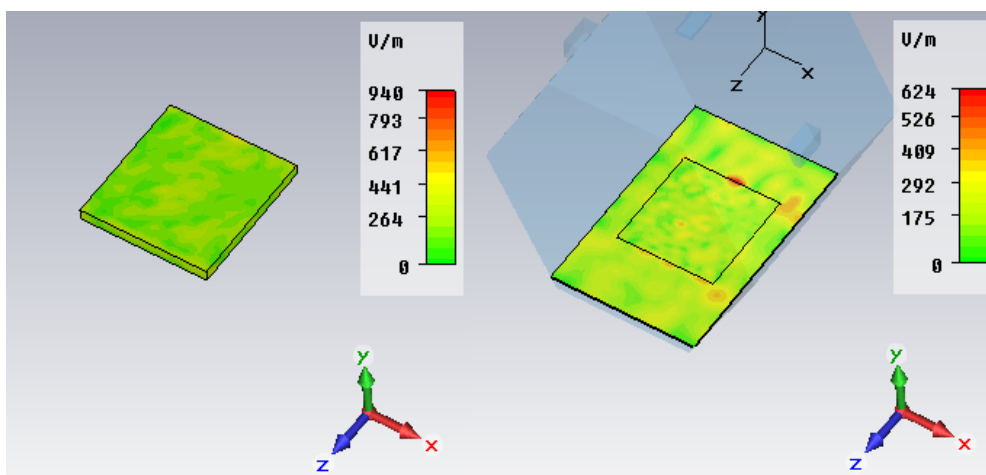
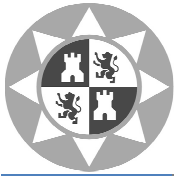


Figura 4. 62 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

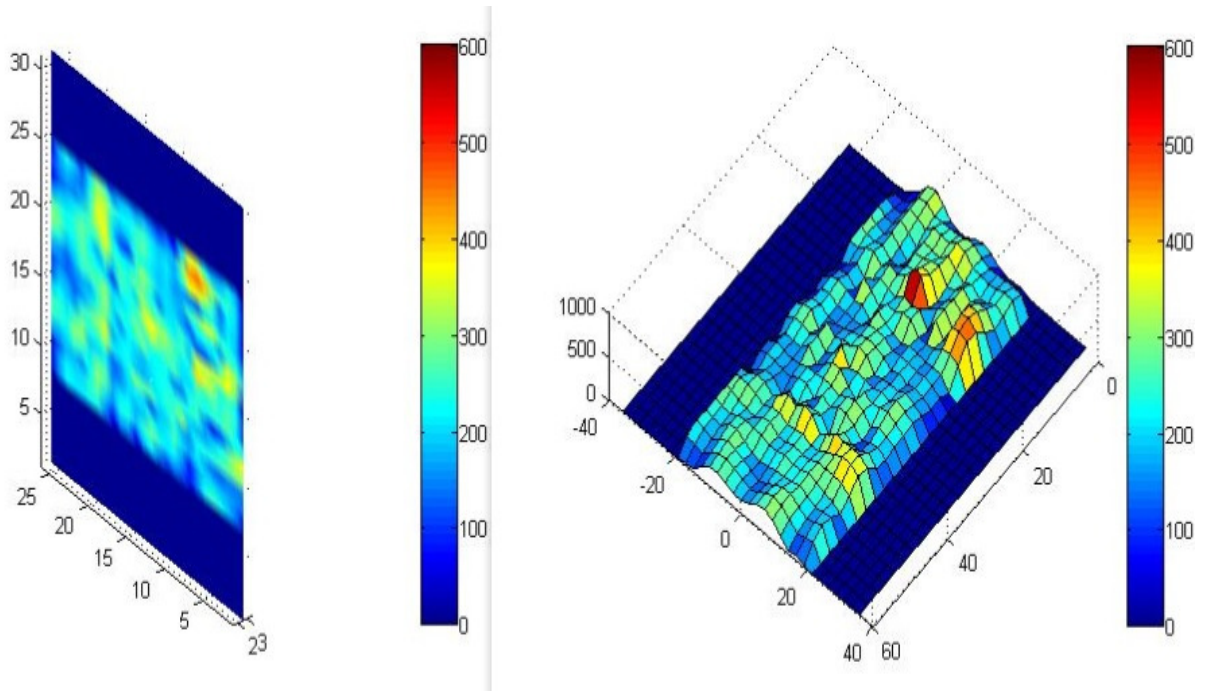
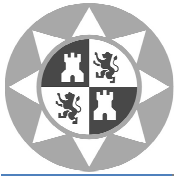


Figura 4. 63 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MÁRMOL
Media (mean E)	194.1490
Varianza (var E)	4.2057e+03
Valor Máximo E	496.9

Tabla 4. 21 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías y muestra de mármol



4.2.2.4 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de maíz.

Para el diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de maíz se observa una muy buena adaptación para el parámetro S2,1 a 2.45 GHz y mala para S1,1 y S3,1.

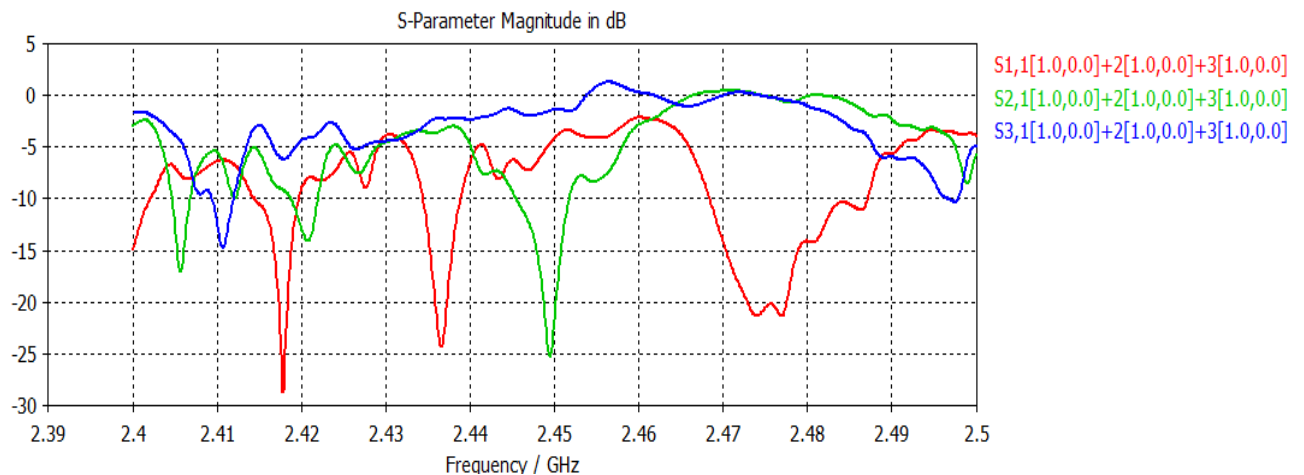


Figura 4. 64 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de maíz

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

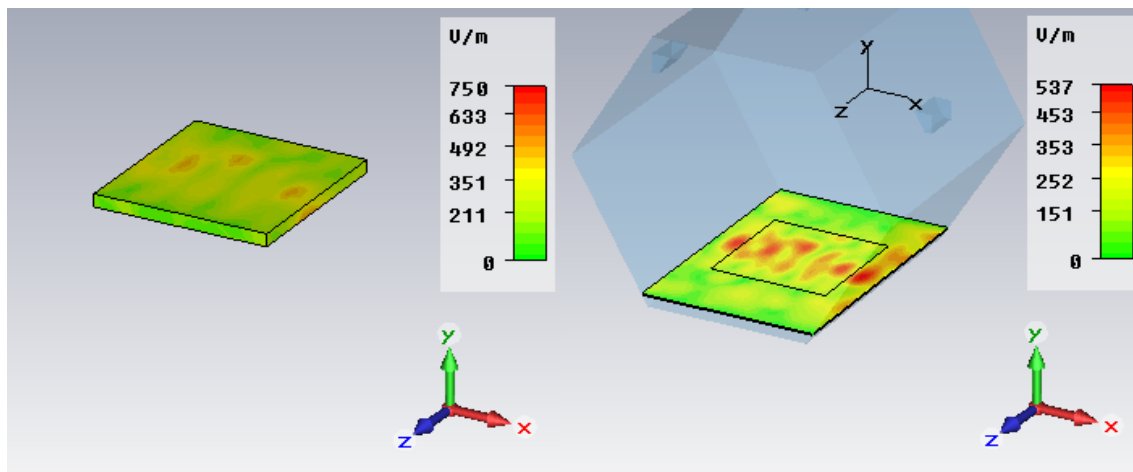
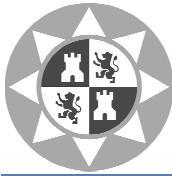


Figura 4. 65 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

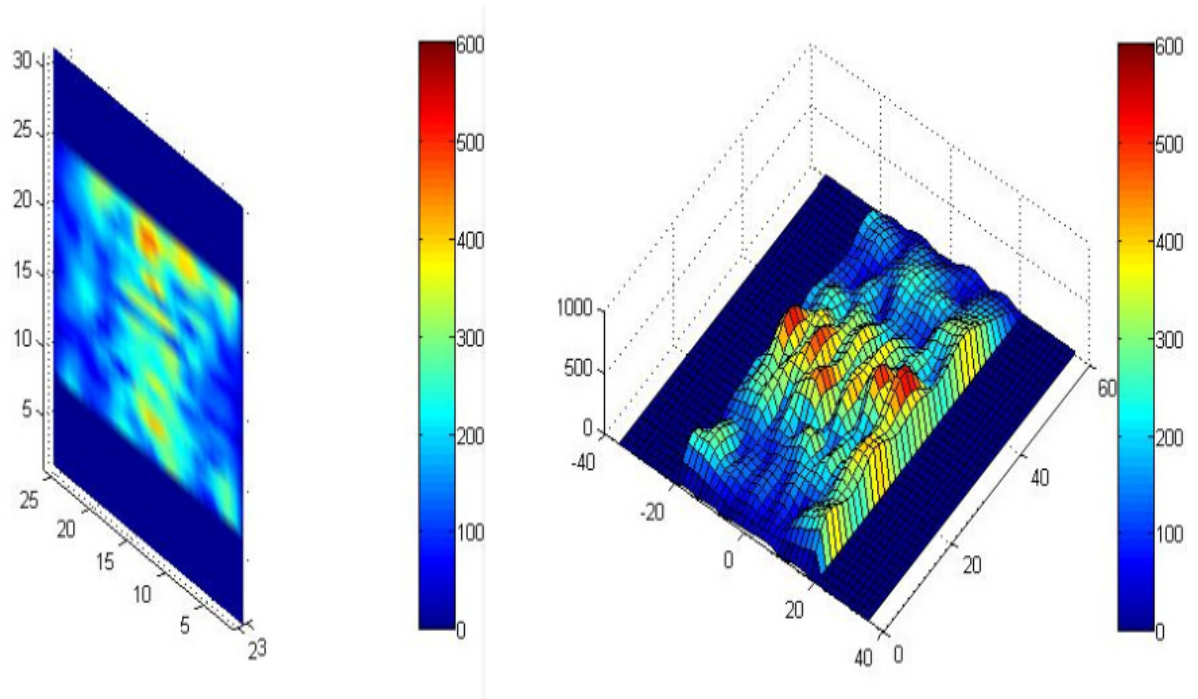
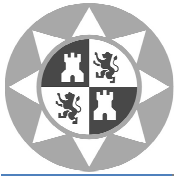


Figura 4. 66 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	MAÍZ
Media (mean E)	261.9835
Varianza (var E)	7.2320e+03
Valor Máximo E	482.6

Tabla 4. 22 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías y muestra de maíz



4.2.2.5 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de trigo.

Para el diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de trigo se observa una buena adaptación para el parámetro S1,1 a 2.45 GHz y mala para S2,1 y S3,1.

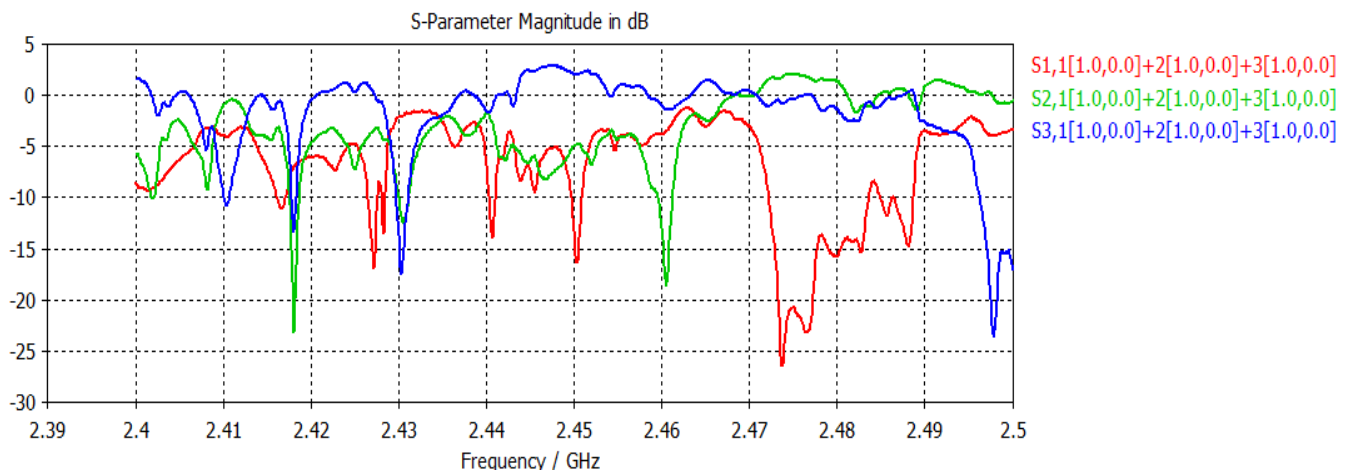


Figura 4. 67 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de trigo

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

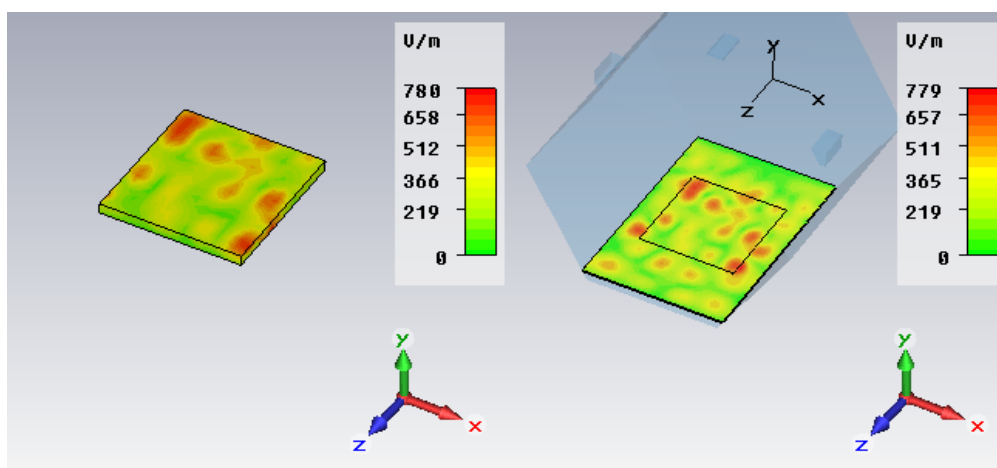
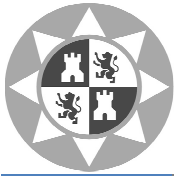


Figura 4. 68 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

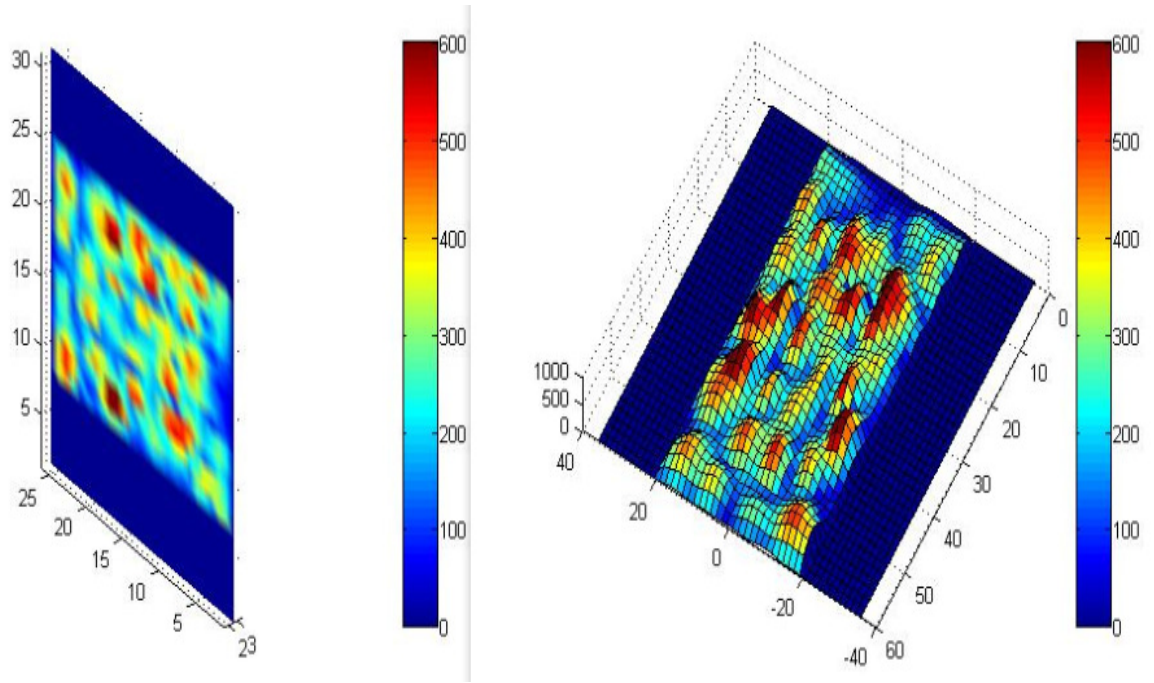
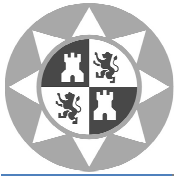


Figura 4. 69 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

Muestra	TRIGO
Media (mean E)	337.7459
Varianza (var E)	1.8801e+04
Valor Máximo E	707.8

Tabla 4. 23 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías y muestra de trigo



4.2.2.6 Diseño hexagonal con tres guías de ondas y muestra de pasta húmeda.

Observando los parámetros S1,1 S2,1 y S3,1 se muestra un sistema muy mal adaptado a la frecuencia de 2.45GHz.

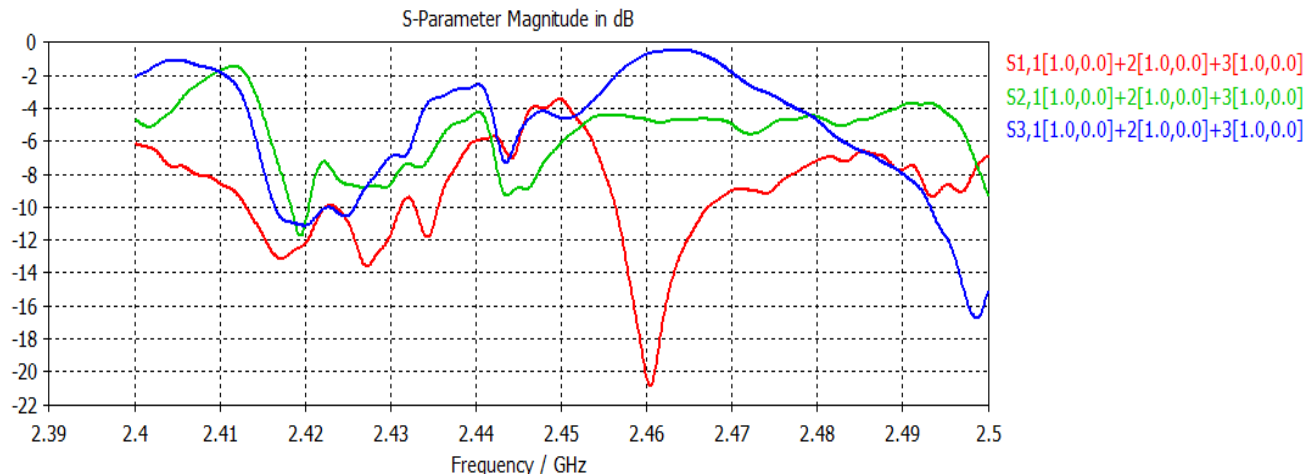


Figura 4. 70 Coeficiente de reflexión del diseño para la muestra de pasta húmeda

A continuación se muestra la imagen del material analizado tanto en una imagen 3D de la pieza completa como en una 2D sobre la superficie, ambas generadas por el propio CST Microwave.

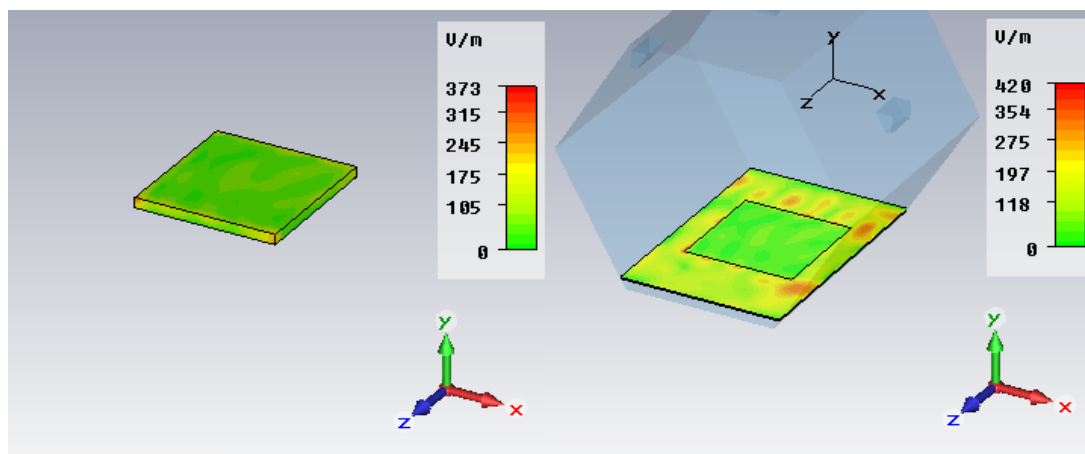
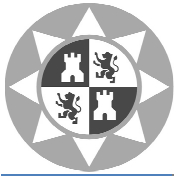


Figura 4. 71 Representación 3D y 2D del valor absoluto del campo eléctrico



Mediante Matlab se han obtenido las representaciones gráficas del valor absoluto del campo eléctrico en la superficie.

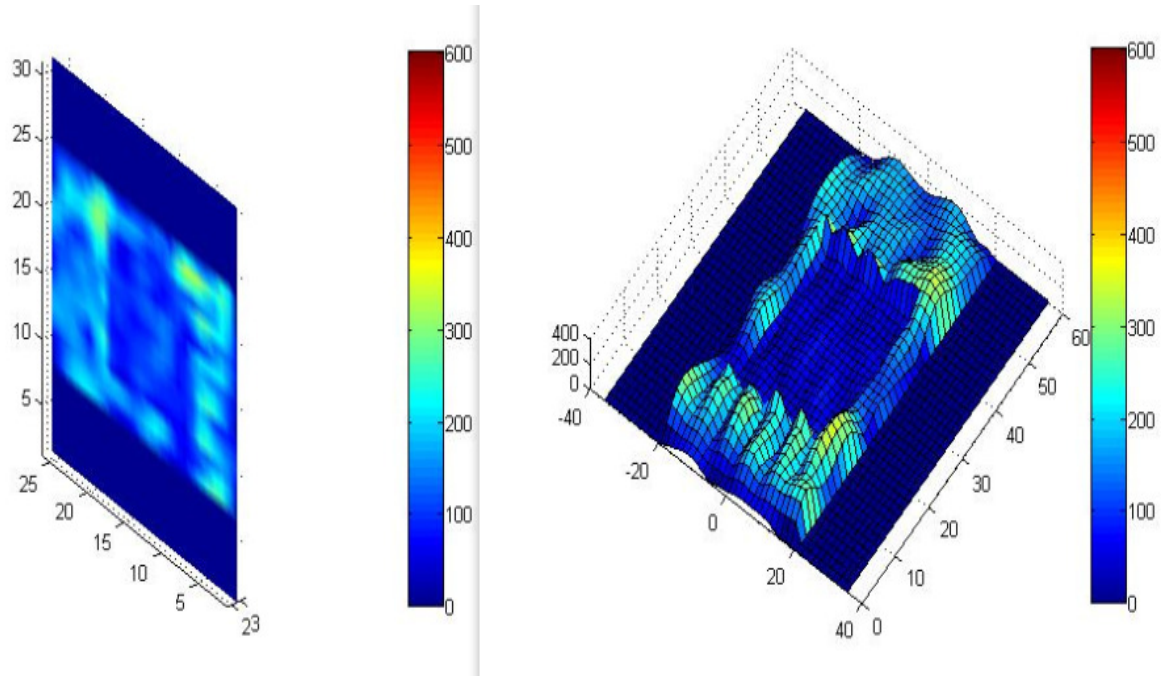
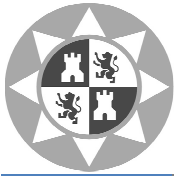


Figura 4. 72 Representación corte volumétrico y plano superficial de la muestra

Para analizar matemáticamente la distribución del campo se calcula mediante Matlab la media, la varianza y el valor máximo del campo eléctrico únicamente sobre la superficie de la muestra.

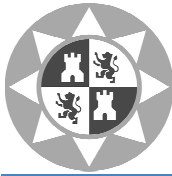
<i>Muestra</i>	PASTA HÚMEDA
<i>Media (mean E)</i>	30.7946
<i>Varianza (var E)</i>	384.0703
<i>Valor Máximo E</i>	113.4

Tabla 4. 24 Parámetros calculados para diseño hexagonal de tres guías y muestra de pasta húmeda



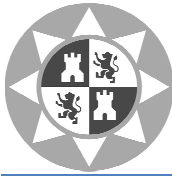
	Cúbico (1 p)	Cúbico (3p)	Hexagonal (1p)	Hexagonal (3p)
RESINA				
<i>Media E</i>	173.2375	267.9214	145.7959	247.8955
<i>Varianza E</i>	3.8879e03	6.1904e03	3.2356e03	5.7844e03
<i>Valor Máx E</i>	354.8	510.5	294.1	513.6
MADERA				
<i>Media E</i>	162.7303	217.5267	211.7518	223.8862
<i>Varianza E</i>	2.5539e03	9.547e03	7.4813e03	5.060e03
<i>Valor Máx E</i>	296.3	638.3	443.1	398.7
MÁRMOL				
<i>Media E</i>	129.3783	208.7902	115.0287	194.1490
<i>Varianza E</i>	2.3525e03	3.768e03	1.9195e03	4.2057e03
<i>Valor Máx E</i>	289.8	412.6	249.1	496.9
MAÍZ				
<i>Media E</i>	96.0759	197.7680	204.2411	261.9835
<i>Varianza E</i>	1.4312e03	5.336e03	2.984e03	7.2320e03
<i>Valor Máx E</i>	184.8	385.9	346.4	482.6
TRIGO				
<i>Media E</i>	121.5296	314.6424	235.5656	337.7459
<i>Varianza E</i>	2.6762e03	1.3267e04	1.0651e04	1.8801e04
<i>Valor Máx E</i>	247.2	671.8	579.4	707.8
PASTA				
<i>Media E</i>	18.7031	35.2272	19.5427	30.7946
<i>Varianza E</i>	65.1542	224.1897	49.1453	384.070
<i>Valor Máx E</i>	49.6	116.1	89.9	113.4

Tabla 4. 25 Tabla resumen estadísticos media y varianza



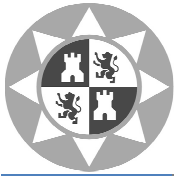
	Cúbico (1 p)	Cúbico (3p)	Hexagonal (1p)	Hexagonal (3p)
RESINA				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	SI	S1,1	SI	S3,1
<i>Distribución del campo</i>	Por puntos de forma desigual	Desigual	En el centro de la muestra	Desigual
MADERA				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	NO	NO	NO	NO
<i>Distribución del campo</i>	Esquinas de la muestra	En un lado de la muestra	En el centro y en las esquinas	Desigual
MÁRMOL				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	SI	S1,1	SI	NO
<i>Distribución del campo</i>	Por puntos de forma desigual	Desigual	En el centro de la muestra	Desigual
MAÍZ				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	NO	NO	ACEPTABLE	S2,1
<i>Distribución del campo</i>	En el centro, lado y en las esquinas	Por puntos en un lado de la muestra	De rayas sobre toda la muestra	En el interior de la muestra
TRIGO				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	NO	NO	ACEPTABLE	S1,1
<i>Distribución del campo</i>	Lado y esquinas de la muestra	Por puntos de forma desigual	En el centro y puntos desigual	Desigual
PASTA				
<i>Sist. Adaptado a 2.45GHz</i>	ACEPTABLE	ACEPTABLE S1,1	SI	NO
<i>Distribución del campo</i>	Ligeramente en el lado y esquinas	Ligeramente en las esquinas	Por puntos de forma desigual	Ligeramente en los bordes

Tabla 4. 26 Adaptabilidad y distribución para cada muestra



	Cúbico (1 p)	Cúbico (3p)	Hexagonal (1p)	Hexagonal (3p)
RESINA		Mayor calentamiento y mayor dispersión	Menor calentamiento y menor dispersión	
MADERA	Menor calentamiento y menor dispersión	Mayor dispersión		Mayor calentamiento
MÁRMOL		Mayor calentamiento	Menor calentamiento y menor dispersión	Mayor dispersión
MAÍZ	Menor calentamiento y menor dispersión			Mayor calentamiento y mayor dispersión
TRIGO	Menor calentamiento y menor dispersión			Mayor calentamiento y mayor dispersión
PASTA	Menor calentamiento	Mayor calentamiento	Menor dispersión	Mayor dispersión

Tabla 4. 27 Temperatura y dispersión para cada muestra



Capítulo 5. Conclusiones.

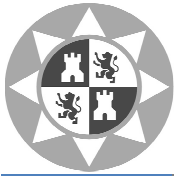
Existe diversos factores que influyen en la eficiencia de calentamiento de una muestra; sus propiedades dieléctricas, características geométricas de la muestra, el agitador de modos, distancia del puerto de alimentación o el diseño del aplicador de microondas cuya influencia es el objetivo de este proyecto.

En este proyecto se ha tratado de analizar y comparar la distribución del campo entre un diseño con un aplicador de microondas cúbico y uno hexagonal. A continuación se comentarán las principales diferencias que se observaron en los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones.

En cuanto a la adaptabilidad del sistema, los resultados obtenidos indican que el diseño hexagonal de un puerto es el que se encuentra mejor adaptado, para todas las muestras el sistema se encuentra centrado o muy cercano a la frecuencia de 2.45GHz. Para los diseños de tres puertos se obtienen peores resultados en cuanto a la adaptabilidad.

Los diseños con tres puertos (tanto cúbico como hexagonal) consiguen un mayor calentamiento sobre tres muestras cada uno. Si sólo comparamos el diseño cúbico y hexagonal de un puerto, el diseño hexagonal obtiene un mayor calentamiento en madera, maíz, trigo y pasta, en alguno de ellos (maíz y trigo) alcanzando el doble, frente al diseño cúbico que obtiene mejor resultado sobre resina y mármol.

Observando la distribución del campo se puede afirmar que el diseño cúbico de un puerto tiende a distribuir el campo más por los lados y esquinas de la muestra, y el diseño hexagonal de un puerto tienen a concentrar el campo en el interior de la muestra. Para los diseños de tres puertos en ambos se observa una distribución más desigual. En cuanto a la dispersión del campo los diseños de un puerto son los que menos dispersión de campo presentan cada uno sobre tres materiales, frente a los diseños de tres puertos que obtienen una mayor dispersión consiguiendo el diseño hexagonal de tres puertos la mayor dispersión en cuatro de los seis materiales analizados.



Capítulo 6. Bibliografía.

- [1] DECAREAU, R. V. y PETERSON R. A. *Microwave processing and engineering*. Ellis Horwood Ltd. Chichester 1986.
- [2] VILLAMIEL, M. *Calentamiento de leche con microondas. Estudio de los principales indicadores de tratamiento térmico*. 1995.
- [3] MIRANDA, J.M ; SEBASTIÁN, J.L ; SIERRA, M. y MARGINEDA, J. *Ingeniería de Microondas: Técnicas experimentales*. Prentice-Hall 2002.
- [4] DIOS DE OTIN, F. *Campos electromagnéticos*. 2009.
- [5] MORENO PIQUERO, E. *Aplicaciones de las radiaciones no-ionizantes*. Clases CEM 2007.
- [6] SALAZAR RODRIGUEZ, S.B. *Influencia del grafito en el procesamiento del espinel MgAl₂O₄ mediante microondas*. Tesis doctoral 1999 Univ. Autónoma Nuevo León.
- [7] MONZÓ CABRERA, J ; DÍAZ MORCILLO, A ; REQUENA PÉREZ, M^a EUGENIA ; DOMÍNGUEZ TORTAJADA, E. y LOZANO GUERRERO, A.J. *Transferencia de Tecnología de Calentamiento por Microondas en el seno del GEM para Sectores Industriales de la Región*. Artículo del GEM, 2006.
- [8] DÍAZ MORCILLO, A. *Aplicaciones industriales del calentamiento por microondas*. Artículo GIMRE (Grupo de Ingeniería de Microondas, Radiocomunicaciones y Electromagnetismo).
- [9] *Microwaves Revolutionise Industrial Thermal Engineering*. Catálogo Vötsch Industrietechnik 2009.
- [10] FERNÁNDEZ, Y ; FIDALGO, B ; ZUBIZARRETA, L ; BERMÚDEZ, J.M ; CALVO, E.G ; ARENILLAS, A y MENÉNDEZ, J.A. *Procesos Térmicos Asistidos por Microondas sobre Materiales Carbonosos*. Artículo del Grupo de Materiales Carbonosos para Aplicaciones Tecnológicas, nº16/2010.
- [11] MONZÓ CABRERA, J. *Aplicaciones industriales del calentamiento asistido por microondas*. UPCT 2009.
- [12] SEGOVIA BARGAS ,D ; GARCÍA CASTILLO, L.E. y GARCÍA LAMPÉREZ, A. *Microondas y circuitos de alta frecuencia*. Universidad Carlos III de Madrid, 2009.